別紙－11

島根原子力発電所２号炉

液状化影響の検討方針について

別紙-11　液状化影響の検討方針について

1. 液状化評価の基本方針
2. 液状化評価対象層の抽出
3. 液状化強度特性の網羅性，代表性
3.1 液状化試験試料採取位置とその代表性
3.1.1 液状化試験試料採取位置の選定
3.1.2 液状化試験試料採取位置の代表性確認
3.2 液状化試験結果
3.2.1 液状化試験方法
3.2.2 液状化試験結果の分類に対する基本的考え方
3.2.3 試験結果の分類
3.3 基準地震動Ｓｓに対する液状化試験の妥当性確認
3.4 簡易設定法
3.5 液状化強度特性の設定方針
4. 液状化影響の評価方針
4.1 液状化影響の検討方針
4.2 液状化検討対象施設の選定
4.2.1 液状化検討対象施設の選定及び解析手法選定の観点
5. 参考文献

1.　液状化評価の基本方針

本資料では，耐震設計における液状化影響の検討方針を示す。

設計基準対象施設（建物，構築物，屋外重要土木構造物及び津波防護施設）及び重大事故等対処施設においては，液状化，揺すり込み沈下等の周辺地盤の変状の影響を考慮した場合においても，当該施設の安全機能が損なわれる恐れがないように設計する。

設計基準対象施設は，防波壁の設置及び地盤改良を実施したことにより地下水の流れが遮断され地下水位が上昇する恐れがあることを踏まえ，地下水位を一定の範囲に保持する地下水位低下設備を設置する。設計基準対象施設（建物，構築物）である原子炉建物等においては，地下水位低下設備の機能に期待して設計地下水位を設定する。また，設計基準対象施設（屋外重要土木構造物及び津波防護施設）及び重大事故等対処施設においては，地下水位低下設備の機能に期待せず，自然水位より保守的に設定した水位を設計地下水位として設定する。なお，各施設の設計地下水位は詳細設計段階において設定する。

設計基準対象施設及び重大事故等対処施設の動的解析において，地震時における地盤の有効応力の変化に伴う影響を考慮する場合には，有効応力解析等を実施する。有効応力解析に用いる液状化強度特性は，敷地の原地盤における代表性及び網羅性を踏まえたうえで実施した液状化強度試験結果よりも保守的な簡易設定法による液状化強度特性を設定する。

設計基準対象施設及び重大事故等対処施設においては，設置状況を考慮し，液状化の影響を検討する必要がある液状化検討対象候補施設を抽出する。液状化検討対象施設については，施設が岩盤中に設置されているか，施設周辺の地下水位が十分に低いかの観点から選定する。

第1-1図に液状化評価の流れ，第1-1表に液状化評価の基本方針を示す。

液状化評価については道路橋示方書・同解説（Ⅴ耐震設計編）（(社) 日本道路協会，H24.3）（以下，「道路橋示方書」という）を基本とするが，液状化評価の対象外となっている50%粒径が10㎜を超過する，又は，10㎜以下であっても10%粒径が１㎜を超過する土層については，粒径２㎜未満の砂を含む場合は念のため液状化試験を実施し，液状化の有無を確認することで保守的な評価を実施し，粒径２㎜未満の砂を含まない場合は土質性状等を踏まえて液状化の有無を確認する。

また，島根原子力発電所の津波防護施設や護岸等は，港湾の施設の技術上の基準・同解説（(社) 日本港湾協会，H19年版）（以下，「港湾基準」という）に基づき設計されていることを踏まえ，港湾基準に基づいた液状化評価も行うが，土の粒径加積曲線が「液状化の可能性あり」の範囲内に含まれない土層については，粒径２㎜未満の砂を含む場合は念のため液状化試験を実施し，液状化の有無を確認することで保守的な評価を実施し，粒径２㎜未満の砂を含まない場合は土質性状等を踏まえて液状化の有無を確認する。なお，島根原子力発電所の設計基準対象施設及び重大事故等対処施設に該当する建物，構築物，屋外重要土木構造物及び津波防護施設は，堅固な地盤上に設置されており，液状化の影響検討を行う地盤

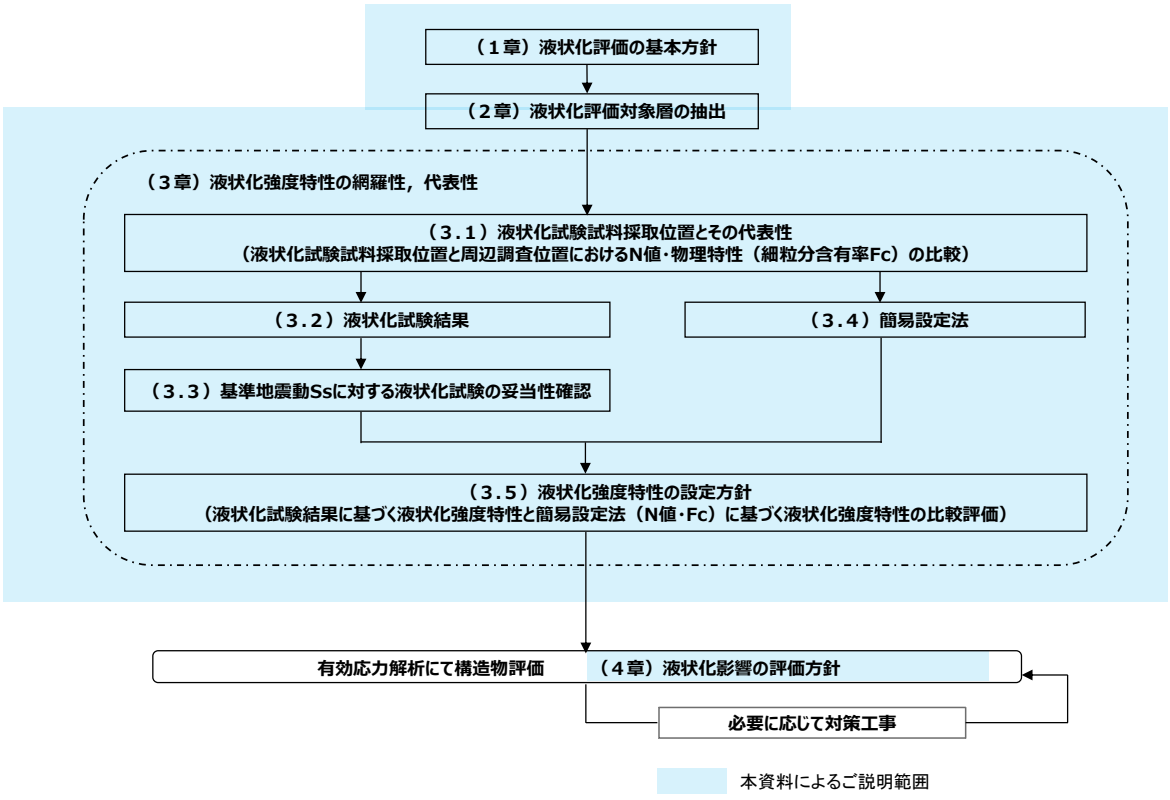
は構造物の「周辺地盤」である。

液状化試験に基づいて，地震時の地盤の状態を『液状化』又は『繰返し軟化（サイクリックモビリティ含む)』，若しくは『非液状化』と判定する。

液状化強度特性は，港湾基準に基づく詳細な計算例をまとめた港湾構造物設計事例集（沿岸技術研究センター，H19年版）（以下，「設計事例集」という）に準拠し，有効応力解析（ＦＬＩＰ）の簡易パラメータ設定法（以下，「簡易設定法」という）により設定する。なお，液状化試験結果が繰返し軟化（サイクリックモビリティ含む)，若しくは非液状化となる土層も，念のため液状化強度特性を設定して保守的な構造物評価を実施する。また，簡易設定法より設定した液状化強度特性は，液状化試験結果による液状化強度特性よりも保守的であることを確認する。

島根原子力発電所の設計基準対象施設及び重大事故等対処施設に該当する建物，構築物，屋外重要土木構造物及び津波防護施設は，堅固な地盤上に設置されていることから，設計地下水位以深の周辺地盤において埋戻土（掘削ズリ）又は砂礫層が分布している構造物の中から，工認段階において液状化影響評価対象施設を選定する。

なお，波及的影響評価において抽出される屋外下位クラス施設に対する基本方針は，波及的影響評価の中で整理を行う。



第1-1 図　液状化評価の流れ

第1-1 表 液状化評価の基本方針

本検討の対象土層				道路橋示方書及び港湾基準における液状化評価の対象	当社評価		
	地層名	堆積年代	調査地点名 土層名		液状化試験による判定	液状化強度特性の設定の考え方	液状化強度特性の保守性
被覆層	盛土	完新世	E-2～E-8，A～E 埋戻土 (掘削ｽﾞﾘ)	× 対象外	「非液状化」 若しくは 「繰返し軟化(ｻｲｸﾘｯｸﾓﾋﾞﾘﾃｨ含む)」	設計事例集に準拠し，FLIPの簡易設定法に基づき設定する。	簡易設定法に基づき設定した液状化強度特性が，液状化試験結果による液状化強度特性と比べ保守的であることを確認する。
	崖錐・海底堆積物	完新世	E-1,E-7,E-8 砂礫層	○ 対象	「繰返し軟化(ｻｲｸﾘｯｸﾓﾋﾞﾘﾃｨ含む)」		

2.　液状化評価対象層の抽出

第2-1表に敷地の地質層序表を示す。敷地の地質は，新第三紀中新世の堆積岩類からなる成相寺層及び貫入岩類，並びにそれらを覆う被覆層から構成される。成相寺層は海成層で，下位より下部頁岩部層，火砕岩部層及び上部頁岩部層に区分される。

被覆層は，崖錐・海底堆積物及び盛土からなる。崖錐・海底堆積物は主に礫混じり砂質土及び礫混じり粘性土からなり，約２m～５mの厚さで，斜面中腹や裾部，あるいは谷部等の傾斜面に分布する。また，盛土は１号炉，２号炉及び３号炉建設時の埋立地等に分布する。

敷地の被覆層である盛土は，埋戻土（掘削ズリ）と埋戻土（粘性土）に分類している。

埋戻土（掘削ズリ）は，発電所建設時の敷地造成において発生した新第三紀中新世の成相寺層の岩砕が主体となっており，広く分布する。

埋戻土（粘性土）は，護岸建設時に，背面の止水性を担保するために幅20m程度にわたり裏込めしたものである。第2-1図に被覆層のボーリング柱状図を示す。

敷地の被覆層である崖錐・海底堆積物は，砂礫層として分類している。

液状化評価対象層については，道路橋示方書及び港湾基準に基づいて対象層を抽出した。第2－2 図に道路橋示方書の液状化評価対象層の抽出フローを示す。

また，第2-3 図に港湾基準の液状化判定に用いる粒度分布図を示す。

第2-4図に発電所建設前の地形立体図を示す。１号炉，２号炉及び３号炉の建設に当たり，周辺の山を掘削して敷地を造成し，原子炉建物，取水槽等の施設を岩盤上に設置した。敷地の前面（北側）に護岸を設置し，敷地造成において発生した岩砕を主体とする埋戻土（掘削ズリ）により埋戻した。なお，護岸背面の止水性を担保するための埋戻土（粘性土）が１，２号炉北側に分布し，砂礫層として分類した崖錐・海底堆積物が１号炉東側，３号炉北側及び輪谷湾周辺において局所的に分布する。

対象設備周辺の地層の分布状況について第2-5図，第2-6図及び第2-7図に整理した。

埋戻土（掘削ズリ）は，敷地全体において概ね全域にわたって広範囲に分布する。

埋戻土（粘性土）は，１，２号炉北側護岸背面にのみ分布する。

砂礫層は，１号炉東側のEL.＋15m以下の敷地，３号炉北側のEL.＋8.5m以下の敷地及び輪谷湾周辺において局所的に分布する。

敷地内における購入地盤材料の使用箇所を第2-8図に示す。取水管，３号炉東側護岸・岸壁，１，２号炉北側護岸，防波堤等において，砕石，基礎捨石，被覆石を使用している。

購入地盤材料は天然石材であり，粒度調整されたものである。

敷地内でEL.＋15m以下に分布する地盤材料の抽出結果を第2-2表に示す。

埋戻土（粘性土）は，護岸建設時に，背面の止水性を担保するために施工して

いる。埋戻土（粘性土）の分布状況，試験に用いた試料の採取位置を第2-9図に，採取した埋戻土（粘性土）の写真を第2-10図に示す。また，塑性図による粘性土の分類を第2-11図に示す。

第2-11図より，埋戻土（粘性土）は，土の液性限界・塑性限界試験（JIS A 1205）より，低液性限界の粘土（CL）に分類される。A線より下側の場合はシルトに分類されるが，埋戻土（粘性土）は塑性指数Ipが大きいため粘土に分類される。

基礎捨石は，１，２号炉北側護岸，防波堤等に使用している。寸法200㎜から250㎜程度の材料を使用しているため間隙が大きく，十分な透水性を有する。基礎捨石の設置状況の写真を第2-12図に示す。

被覆石は，１，２号炉北側護岸等に使用している。寸法700㎜から800㎜程度の材料を使用しているため間隙が大きく，十分な透水性を有する。被覆石の寸法及び設置状況の写真を第2-13図に示す。

道路橋示方書に基づき液状化評価対象層を抽出した結果を第2-14図に示す。液状化の判定を行う必要がある土層は砂礫層のみである。

港湾基準に基づき液状化評価対象層を抽出した結果を第2-15図に示す。粒径加積曲線が「液状化の可能性あり」の範囲内に含まれないため，液状化の判定を行う必要がある土層はない。

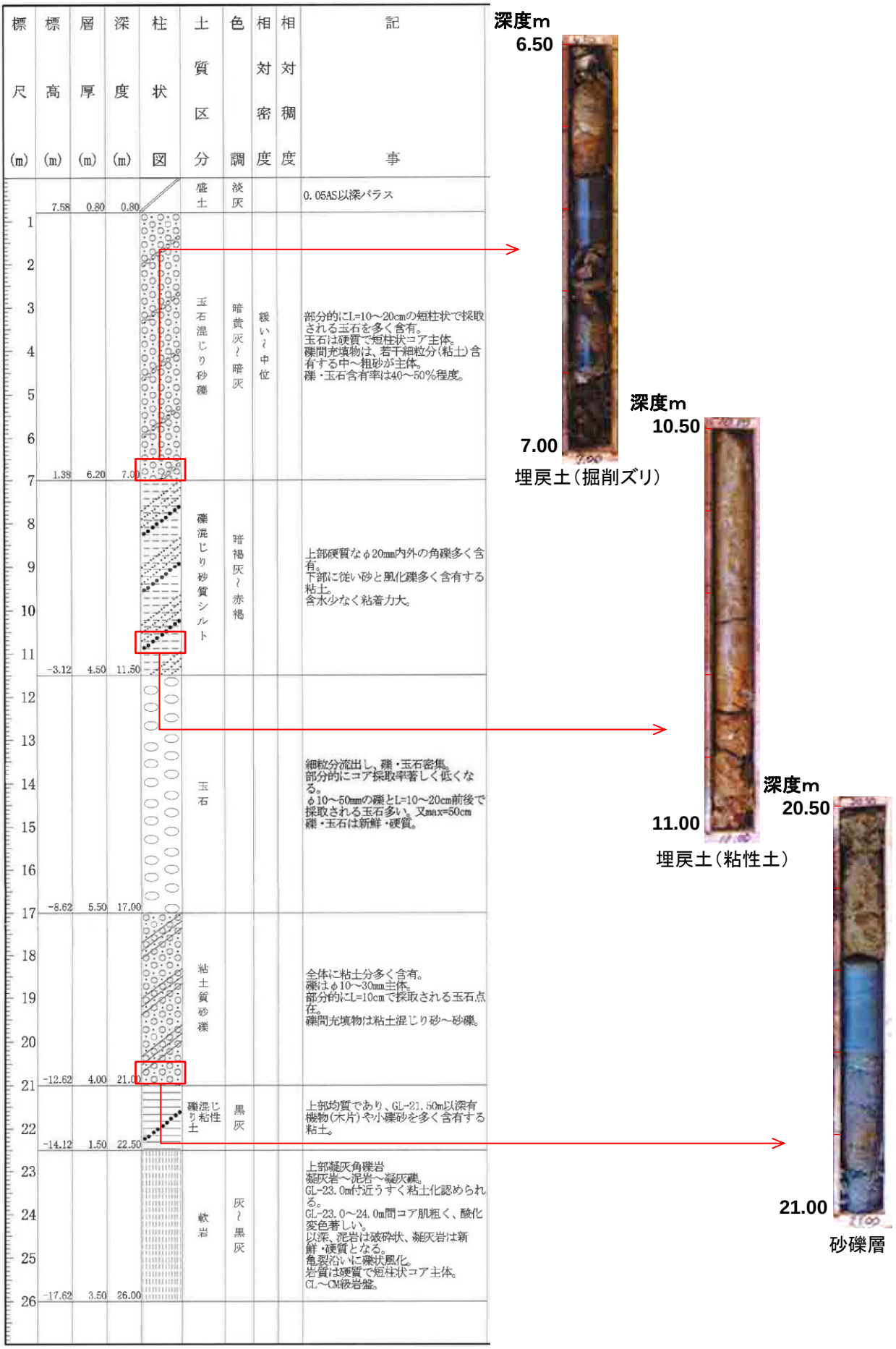
道路橋示方書では，50％粒径が10㎜以下で，かつ，10％粒径が１㎜以下である土層について液状化評価対象層としているが，本評価では50％粒径が10㎜を超過する，又は，50％粒径が10㎜以下であっても10％粒径が１㎜を超過する土層についても，同様に抽出対象とする。

港湾基準では，粒度による土の分類を行い，粒径加積曲線が「液状化の可能性あり」の範囲内に含まれる土を液状化評価対象層としているが，範囲以外に含まれる土についても同様に抽出対象とする。

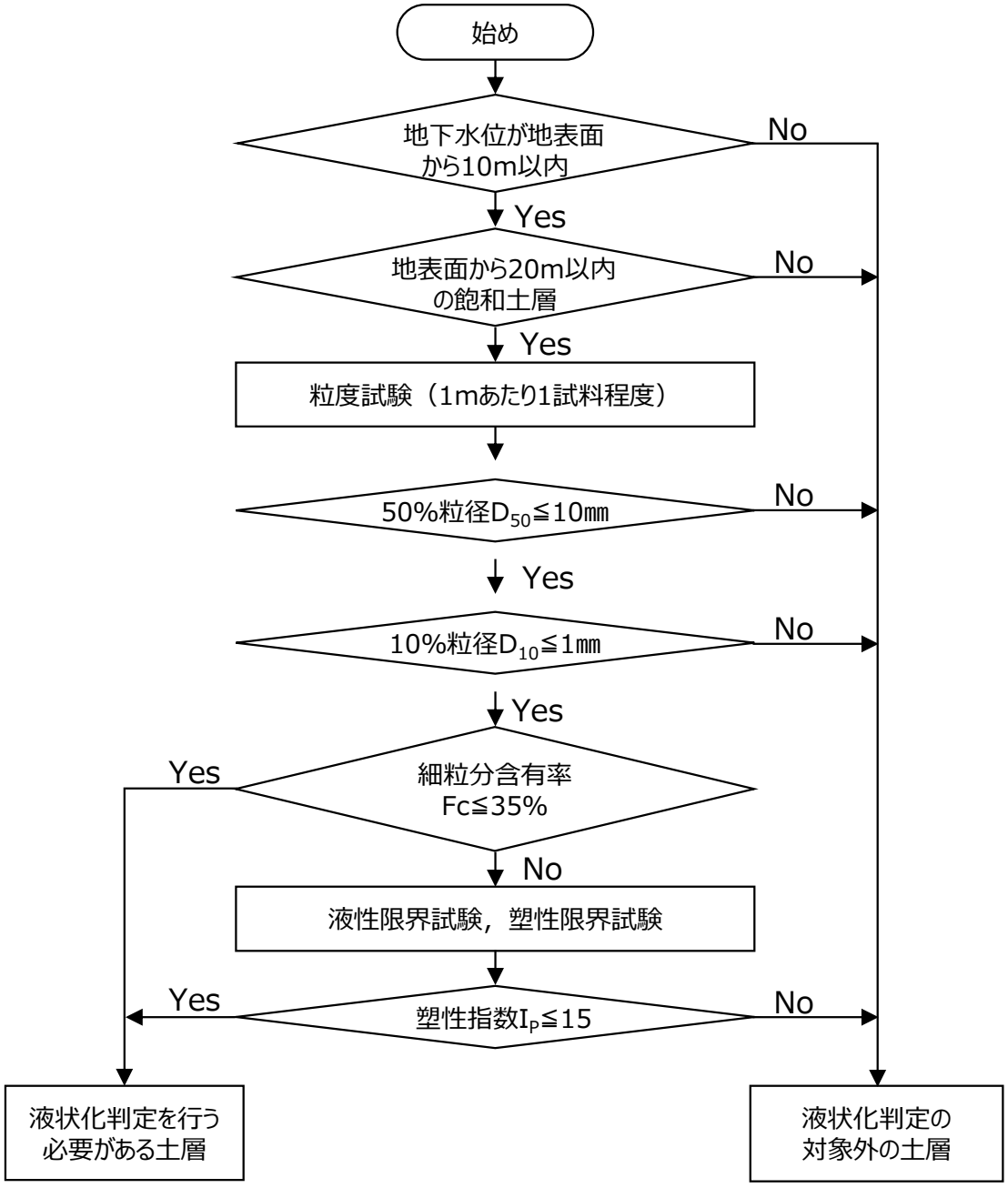
以上より，敷地内の液状化評価対象層として，被覆層の分布状況，道路橋示方書及び港湾基準に基づく液状化評価対象層の抽出結果を踏まえ，保守的に埋戻土（掘削ズリ）及び砂礫層を抽出した。

第2-1 表　敷地の地質層序表

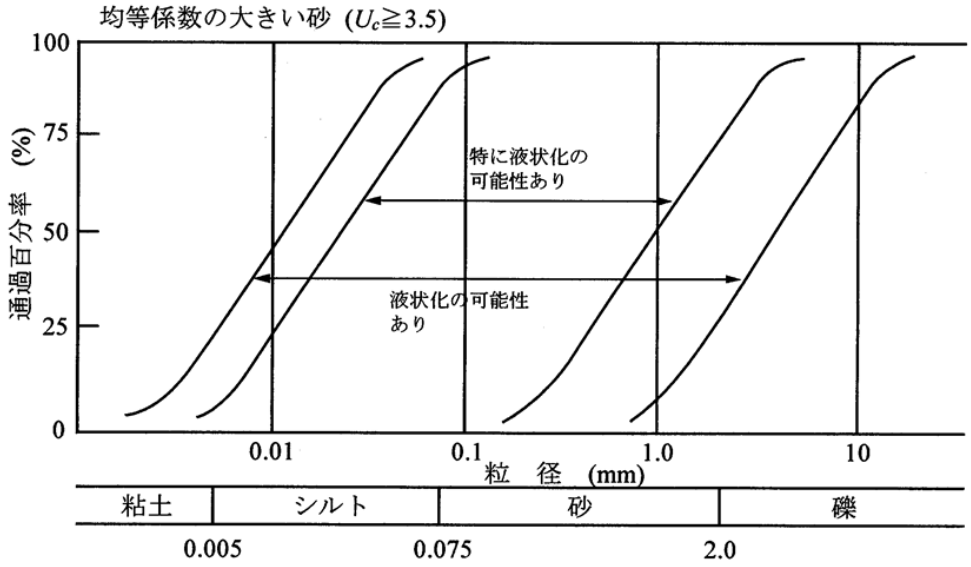
地質時代			地層名		主要構成地質
新生代	第四紀	完新世	被覆層	盛土	埋戻土(掘削ズリ)・埋戻土(粘性土)
				崖錐・海底堆積物	礫混じり砂質土・礫混じり粘性土
	新第三紀	中新世	貫入岩類		ドレライト・安山岩
			成相寺層	上部頁岩部層	黒色頁岩
				火砕岩部層	凝灰岩・凝灰角礫岩
				下部頁岩部層	黒色頁岩・凝灰質頁岩



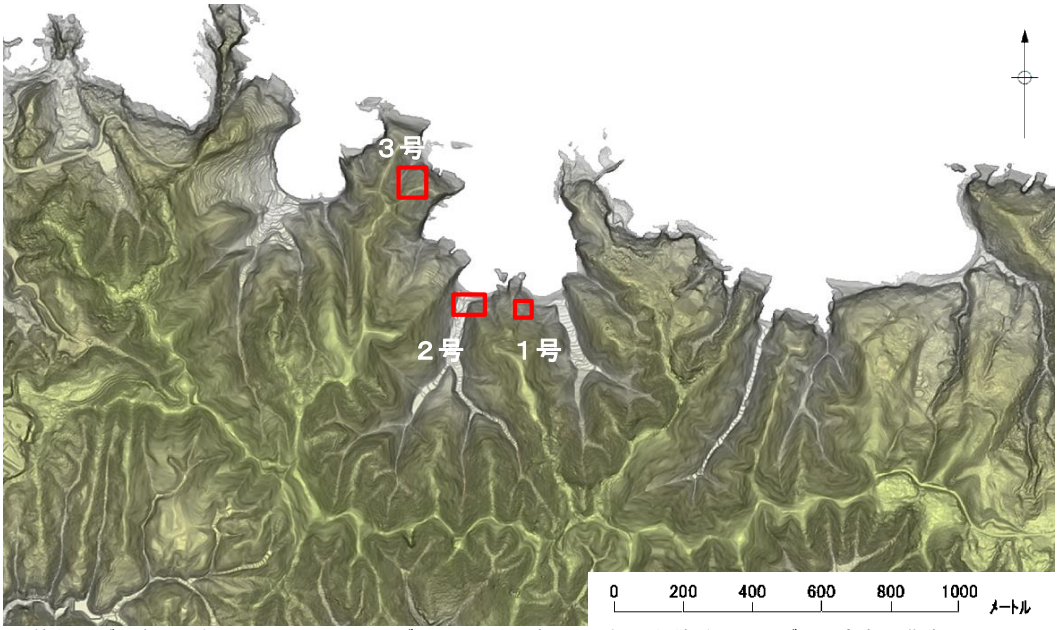
第2-1 図　敷地内の被覆層について



第2-2 図　液状化評価の対象層の抽出フロー　道路橋示方書

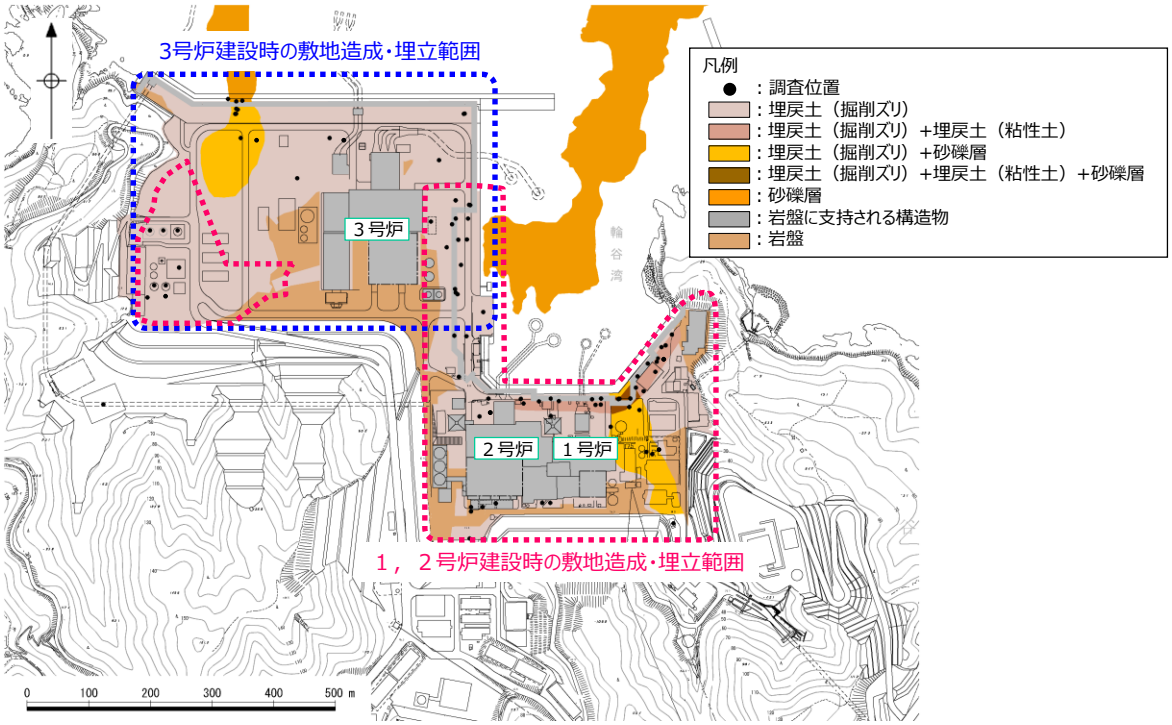


第2-3 図　粒度による液状化判定　港湾基準

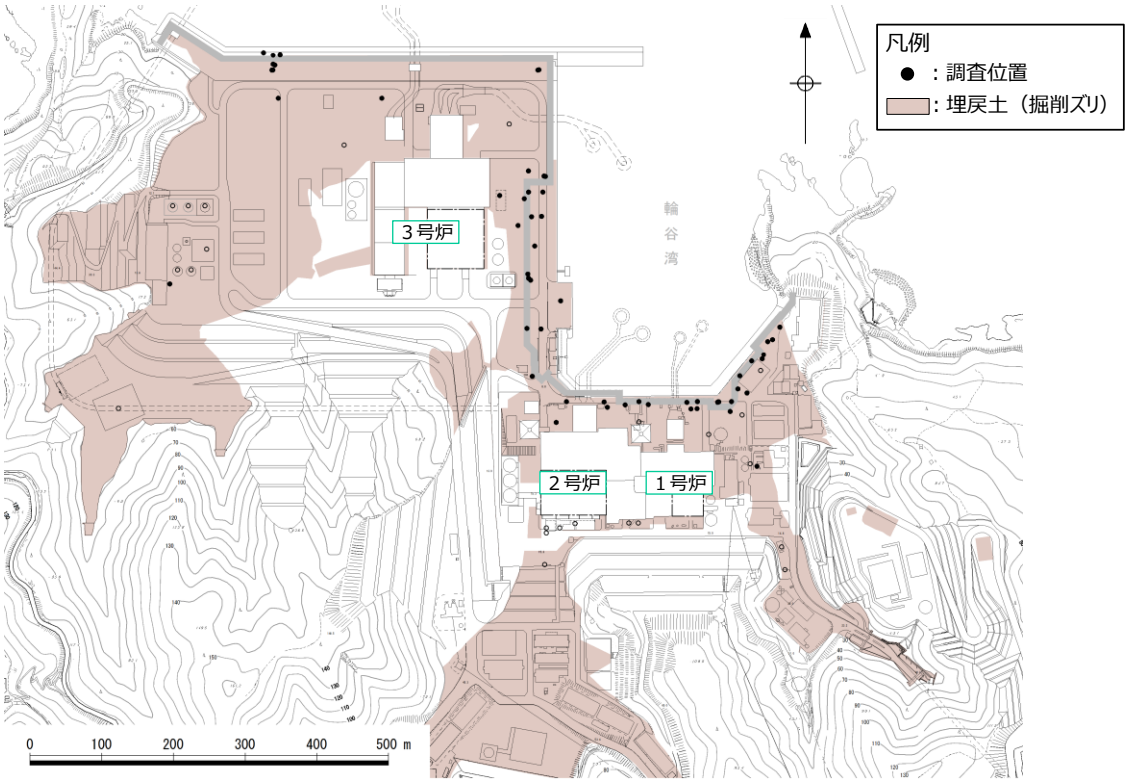


※航空レーザー測量で取得した2mメッシュのＤＥＭデータに，空中写真により取得した旧地形のＤＥＭデータを合成して作成したもの

第2-4 図　発電所建設前の地形立体図

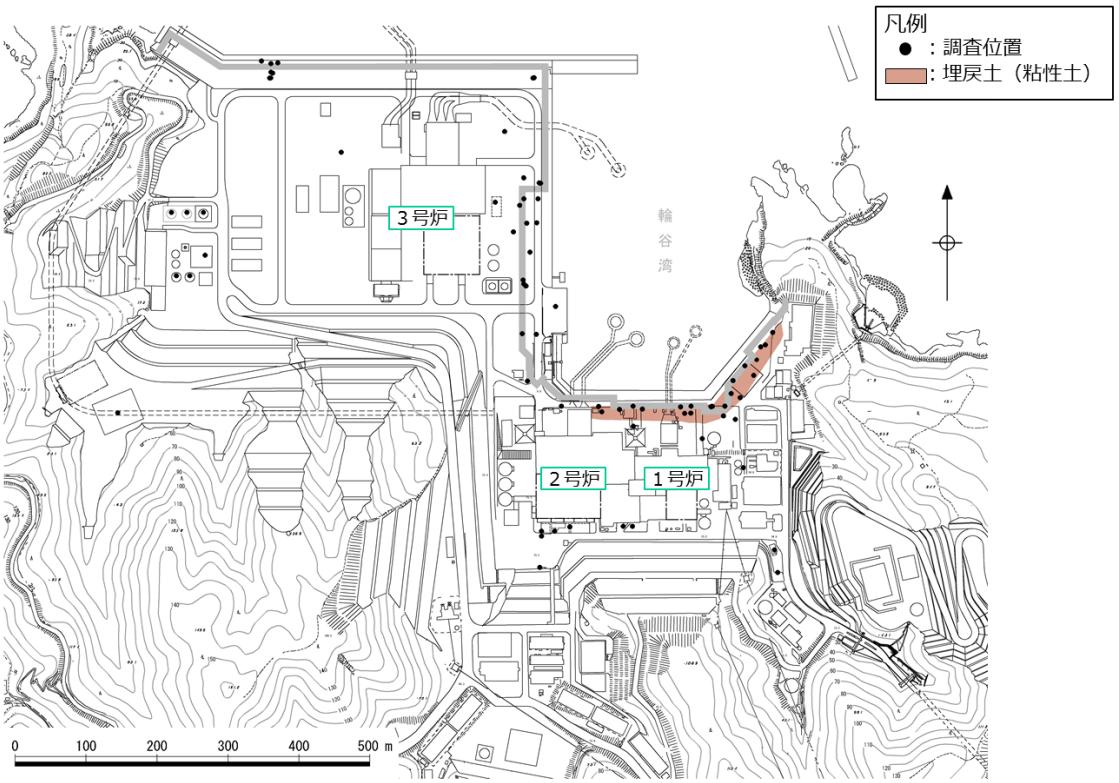


第2-5 図　敷地の被覆層（平面図）

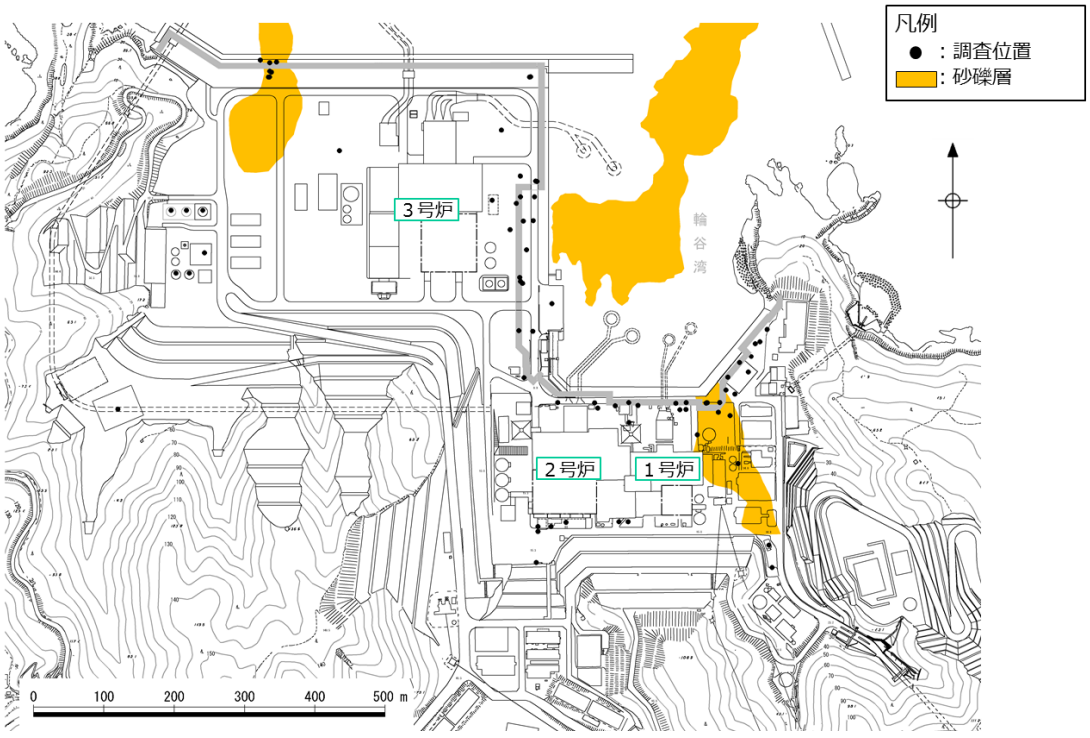


第2-6 図　敷地の地層分布状況（平面図）

(a)　埋戻土（掘削ズリ）分布図

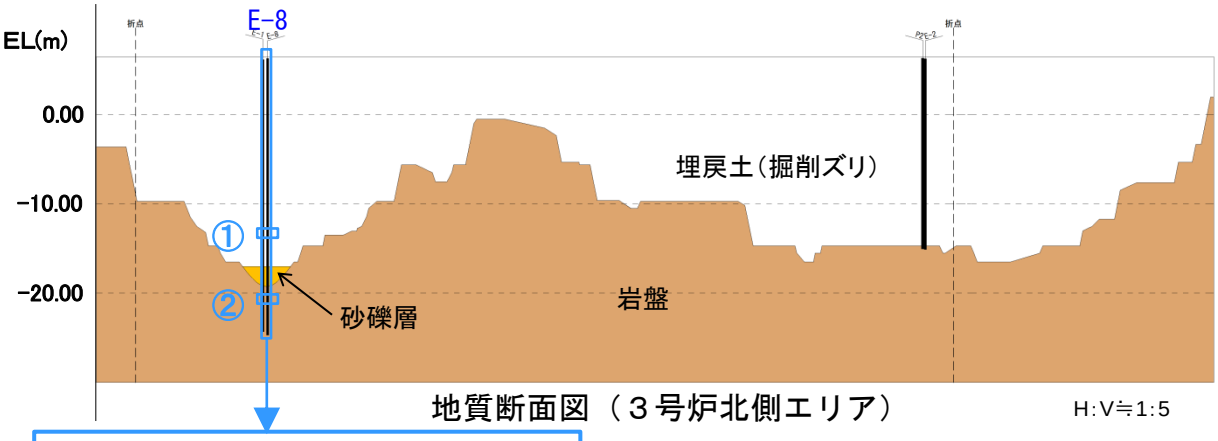


第2-6 図　敷地の地層分布状況（平面図）
(b)　埋戻土（粘性土）分布図



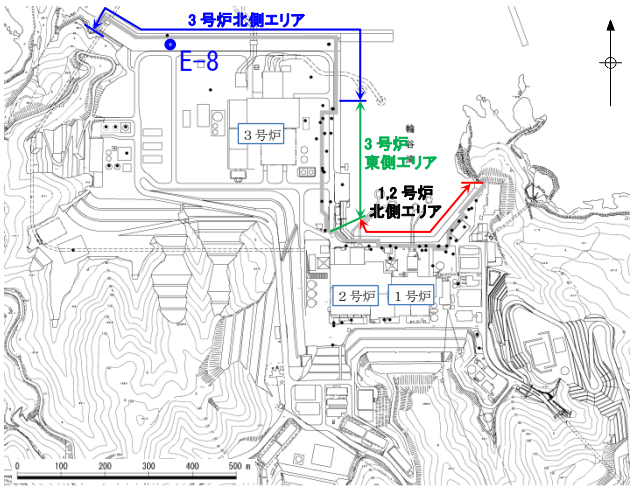
※輪谷湾周辺の砂礫層分布（自社調査（H7））

第2-6 図　敷地の地層分布状況（平面図）
(c)　砂礫層分布図



地質断面図（３号炉北側エリア）　H:V≒1:5

標尺 (m)	標高 (m)	層厚 (m)	深度 (m)	柱状図	土質区分	色調	相対密度	相対稠度	記事	
1	4.82	1.50	1.50		玉石混り砂質礫	暗褐灰			試掘区間の埋戻し土、片状の玉石点在、φ70mmの片状～角礫状にて採取。礫はφ50mm以下の角礫、礫間は砂～細礫が充填。低含水。	
2										
3										
4										
5	0.82	4.00	5.50		玉石混りシルト質砂質礫	暗褐～黄褐	中位～非常に密な		玉石を片状～角礫状にて採取。φ50mm～30mm以下の角礫混入する。礫間は細礫～粘土質砂からなり、礫混入量にばらつきあり、一部風化礫層状。低含水。	
	0.52	0.30	5.80		コンクリート	灰			旧表層コンクリート	
6	-0.18	0.70	6.50		砂質礫		密な		細礫～粗砂主体。含水中位。	
7										
8					礫質砂・砂質礫	暗灰～暗青灰	緩い		粗砂～細礫主体。全般に高含水で崩壊性に富む。	
9	-3.03	2.85	9.35							
10	-4.13	1.10	10.45		シルト質礫質砂	暗灰～暗緑灰	緩い		粗砂～細礫主体。一部φ50mm前後の片状礫、亜角礫が混じる。全般にシルト混じる。高含水で崩壊性に富む。	埋戻土（掘削ズリ）
11	-5.08	0.95	11.40		玉石	淡青灰			L=90cmの転石、捨石。凝灰岩質でやや軟質、伏在亀裂で割れやすい。コア採取時に分離する。掘削でコア周面は紛体化。	
	-5.38	0.30	11.70							
12					玉石混り砂質礫	暗灰～褐灰			L=10cmの玉石、φ50mm以下の角礫主体、礫間は細礫～粗砂。若干の細粒分伴う。	
13										
14	-7.38	2.00	13.70		粘土質礫質砂	暗褐～暗灰黄褐	中位		φ30mm以下の亜角礫、細礫主体、礫間はやや粘土～シルト質、含水高い。	
15	-8.98	1.60	15.30		玉石混り粘土質砂質礫	淡青～黄褐灰	非常に密～中位		L=10cm柱状～片状の玉石、φ50mm以下の角礫、礫間は細礫～粗砂、全体に細粒分あり。	
16										
17					玉石混り砂質礫	青褐灰	緩い～非常に密な		L=10cm柱状～片状の玉石、φ50mm以下の角礫、礫間は細礫～粗砂、全体に細砂～細粒分質。	
18										
19										
20	-13.68	4.70	20.00							
21				①	玉石混り粘土砂質礫	青褐灰	中位～非常に密な		L=20cm柱状～片状の玉石、φ50mm以下の角礫、礫間は細礫～粗砂、全体に細砂～細粒分質。	
22	-15.88	2.20	22.20							
23	-17.03	1.15	23.35		コンクリート	灰			基礎コンクリート。	
	-17.48	0.45	23.80		礫質粗砂	淡灰			上層10cm弱は暗灰色の細砂、以深は半固結状の砂。	
24										
25	-18.68	1.20	25.00		玉石混り礫混り砂	淡灰～青褐灰	中位		固結状～未固結状、変状の玉石伴う。GL-24.8m～25.0m間に3L=3～5cmの木片挟む。	砂堆積部
	-19.18	0.50	25.50		礫質砂質粘土	暗灰		軟い	高含水、φ20mm以下の礫、砂を混入、木片挟む。	
26				②	粘土質砂質礫	暗灰～暗褐灰	中位		φ20mm以下の礫～細礫主体。全体に粘土質。	
27	-20.58	1.40	26.90							
28	-22.28	1.70	28.60		玉石混りシルト混り砂質礫	暗赤褐～青褐灰	中位～非常に密な		基底礫層。片状～20cm柱状の玉石が混じる。φ50mm以下の亜円礫主体、礫間は細礫～砂が充填。	
29										
30					凝灰岩・軟岩	淡青灰～暗灰			基盤岩、凝灰岩～火山礫凝灰岩～GL-30.8m以深は泥質。5cm～20cm柱状コア主体、一部岩片状～円盤状コア。GL-29m以浅の割目は開口し細粒分が流入する。	基盤岩
31	-24.68	2.40	31.00							
32										



敷地平面図

深度

20.50m　21.00m



①

埋戻土（掘削ズリ）

26.50m　27.00m



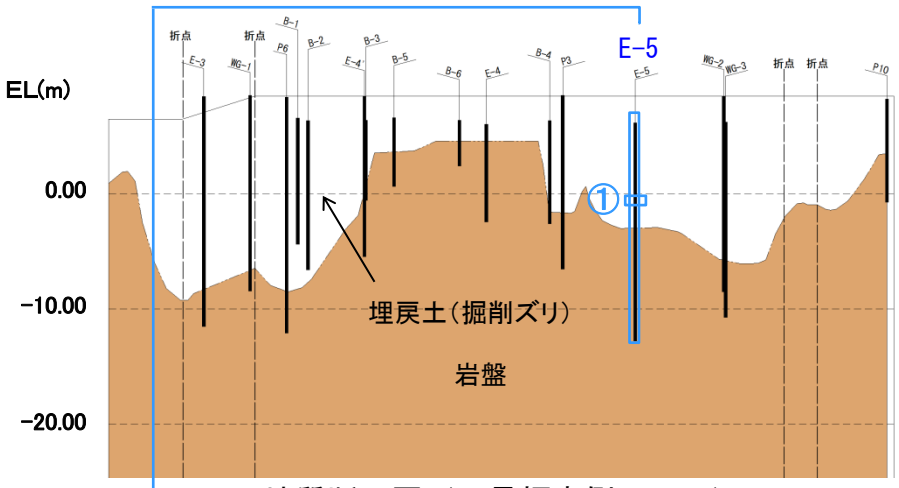
②

砂礫層

コア写真

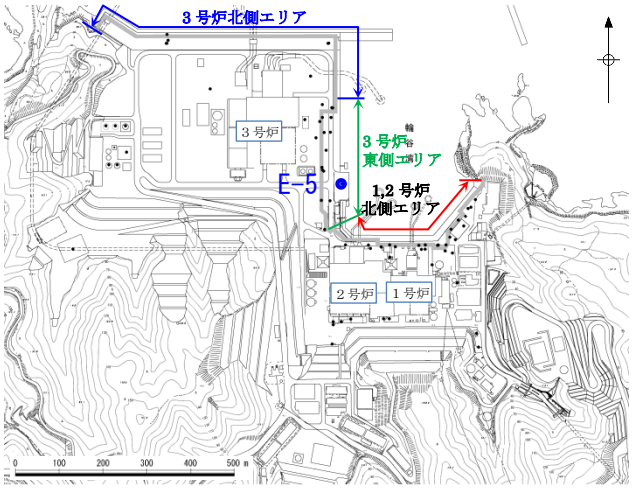
第2-7 図　敷地の地層分布状況（断面図）

(a)　３号炉北側エリア分布図



地質断面図（３号炉東側エリア）　H:V≒1:5

標尺 (m)	標高 (m)	層厚 (m)	深度 (m)	柱状図	土質区分	色調	相対密度	相対稠度	記事	
1	4.69	1.50	1.50		砂質礫	暗褐			試掘区間の埋戻し土。礫はφ50mm以下の砕石状の角礫、礫間は細礫、粗砂が充填。低含水。	
2〜13	-7.31	12.00	13.50	①	玉石混り砂質礫	暗褐	緩い～非常に密な		玉石を片状～30cm柱状にて採取。φ50mm～30mm以下の角礫混入する。礫間は細礫～粘土質砂からなり、礫混入量にばらつきあり、一部風化礫層状。全漏水する。	埋戻土（掘削ズリ）
14〜16	-9.91	2.60	16.10		シルト・砂・玉石	淡褐灰	緩い～非常に密な		L=500～800mm転石主体、一部の転石は表面や割れ目沿いで固結粘土状に軟化する。礫間は不均質で風化起源のシルト質細粒土～貝殻細片が混じる海砂状のシルト混り中砂。φ10mm前後の小礫が混じる。	
17	-11.71	1.80	17.90		凝灰岩・軟岩	青灰～青褐灰			基盤岩。円盤状～10cm柱状コア。全般にコアは脆く、深度に伴い硬質となる。GL-17m付近は白濁化して軟化する。	基盤岩
18〜19	-12.81	1.10	19.00		凝灰岩・軟岩	青褐灰			縦亀裂が伏在する100cm柱状コア。岩片は比較的硬質。伏在亀裂沿いやや脆く割れやすい。	
20										



敷地平面図

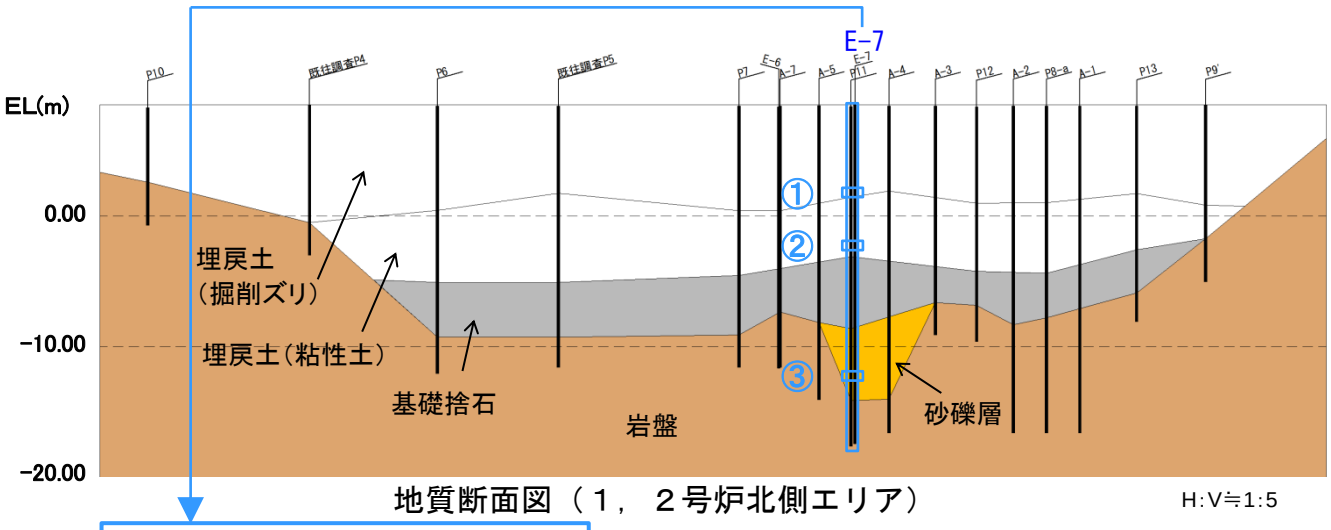
深度
7.50m　　8.00m



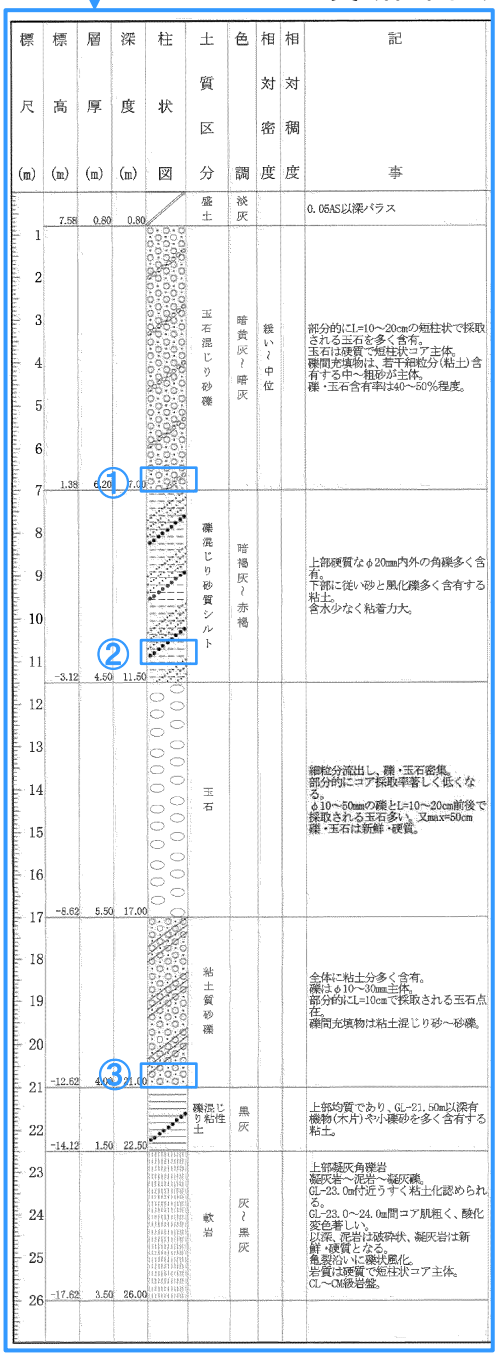
埋戻土（掘削ズリ）

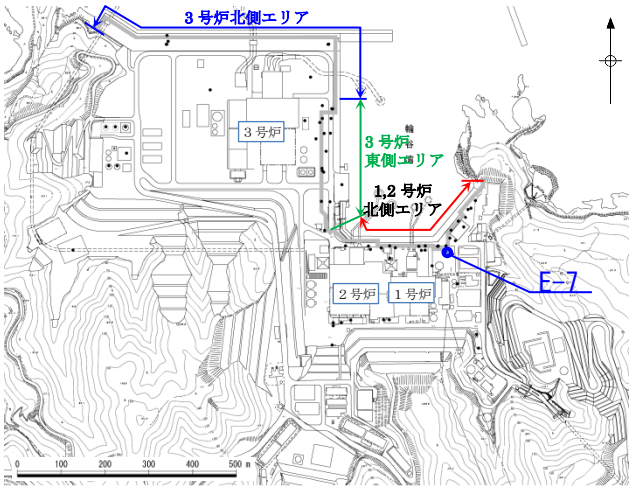
コア写真

第2-7 図　敷地の地層分布状況（断面図）
(b)　３号炉東側エリア分布図

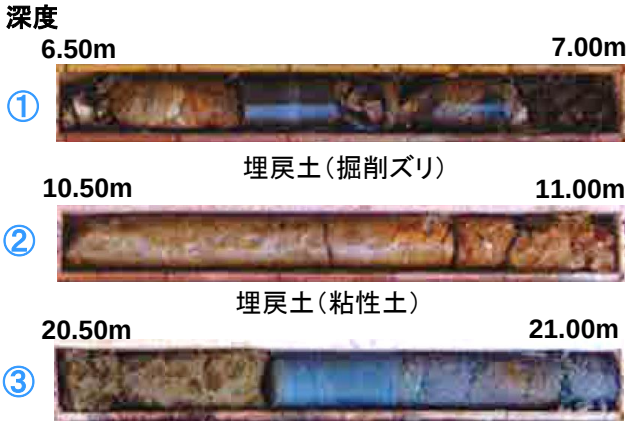


地質断面図（１，２号炉北側エリア）　H:V≒1:5



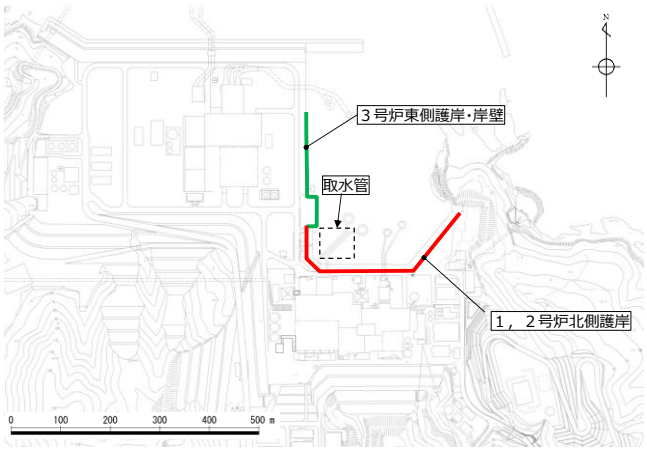


敷地平面図

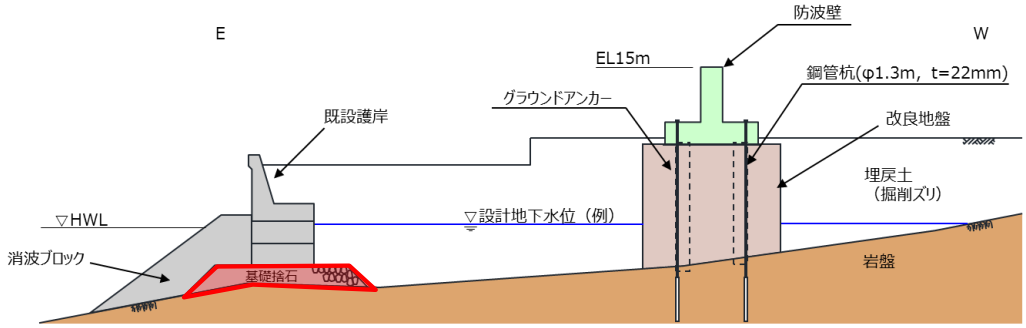


コア写真

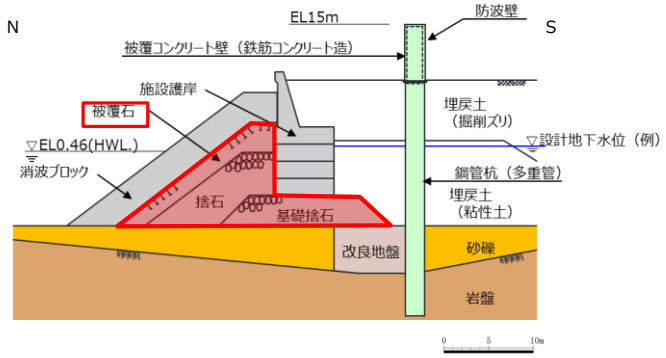
第2-7 図　敷地の地層分布状況（断面図）
（c）　１，２号炉北側エリア分布図



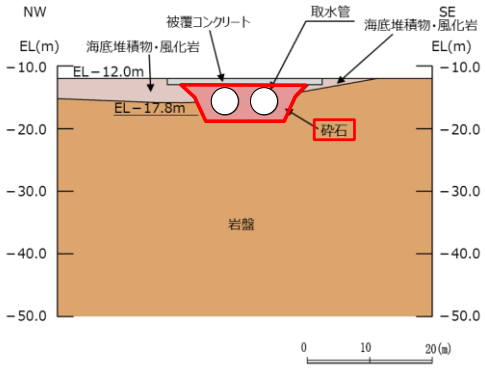
敷地平面図



3号炉東側護岸



1，2号炉北側護岸

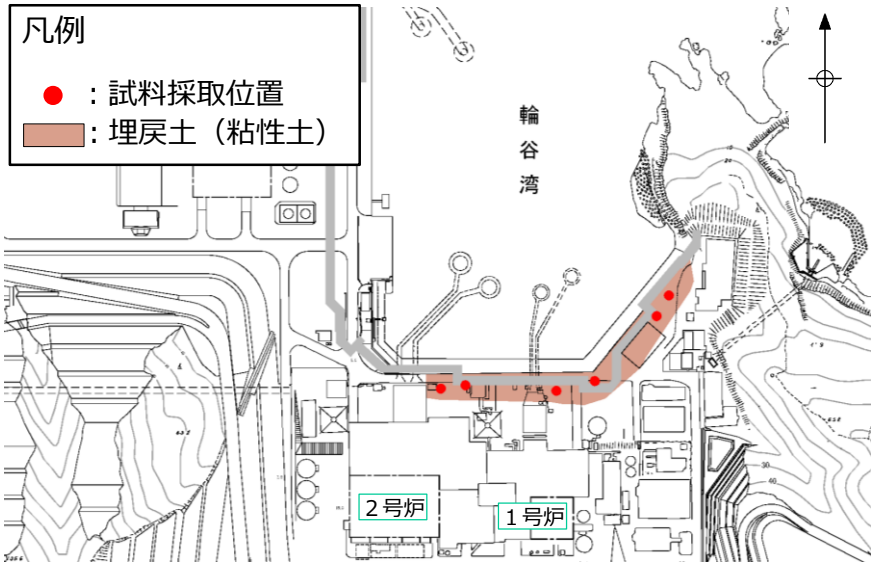


取水管

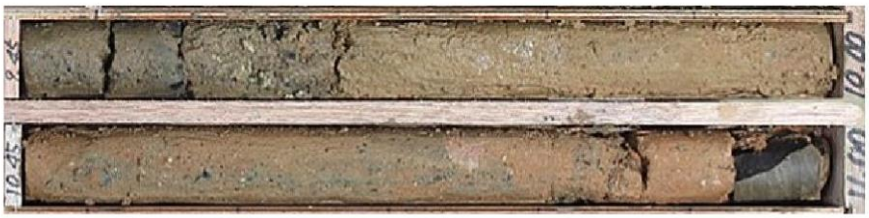
第2-8 図　購入地盤材料の使用箇所

第2-2 表　地盤材料の液状化判定の要否（EL. ＋15m以下）

地盤材料	規　格	分布場所･使用場所	液状化判定の要否
埋戻土 (掘削ズリ)	－	･概ね全域に分布	粒径2mm未満の砂を含むため，道路橋示方書に基づき液状化判定を実施する。
埋戻土 (粘性土)	－	･１，２号炉北側護岸 背面に分布	粘土質であるため対象外とする（土の液性限界･塑性限界試験（JIS A 1205）結果：I_p=27.3）。
砂礫層 (崖錐･海底堆積物)	－	･１号炉東側に局所的に分布 ･３号炉北側に局所的に分布 ･輪谷湾内に分布	粒径2mm未満の砂を含むため，道路橋示方書に基づき液状化判定を実施する。
砕石	20～80mm (底部のみ5～20mm)	･取水管	粒径の大きい地盤材料であるため港湾基準の「液状化の可能性あり」の範囲外であること，十分な透水性を有することから，対象外とする。
基礎捨石	200～250mm程度 （30kg/個以上）	･１，２号炉北側護岸 ･３号炉東側護岸･岸壁	粒径の大きい地盤材料であるため港湾基準の「液状化の可能性あり」の範囲外であること，十分な透水性を有することから，対象外とする。
被覆石	700～800mm程度 （1.5t/個）	･１，２号炉北側護岸	粒径の大きい地盤材料であるため港湾基準の「液状化の可能性あり」の範囲外であること，十分な透水性を有することから，対象外とする。

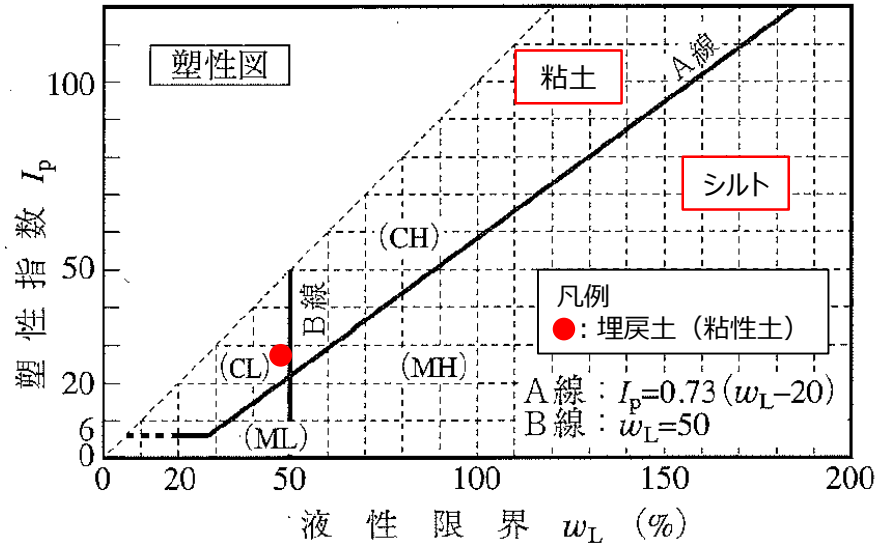


第2-9 図　埋戻土（粘性土）の分布状況及び試料採取位置



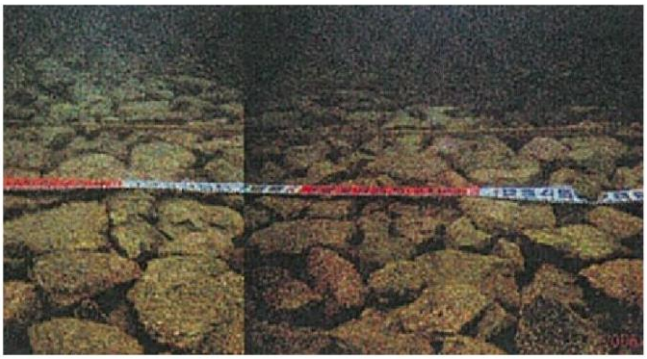
第2-10 図　採取した埋戻土（粘性土）

	液性限界 w_L（%）	塑性限界 w_p（%）	塑性指数 I_p
埋戻土（粘性土） （平均値，試験数：22）	48.5	21.2	27.3



※ 地盤工学会，H22：土質試験 基本と手引き に加筆

第2-11 図　塑性図による粘性土の分類



基礎捨石設置状況（防波堤）

第2-12 図　基礎捨石の設置状況



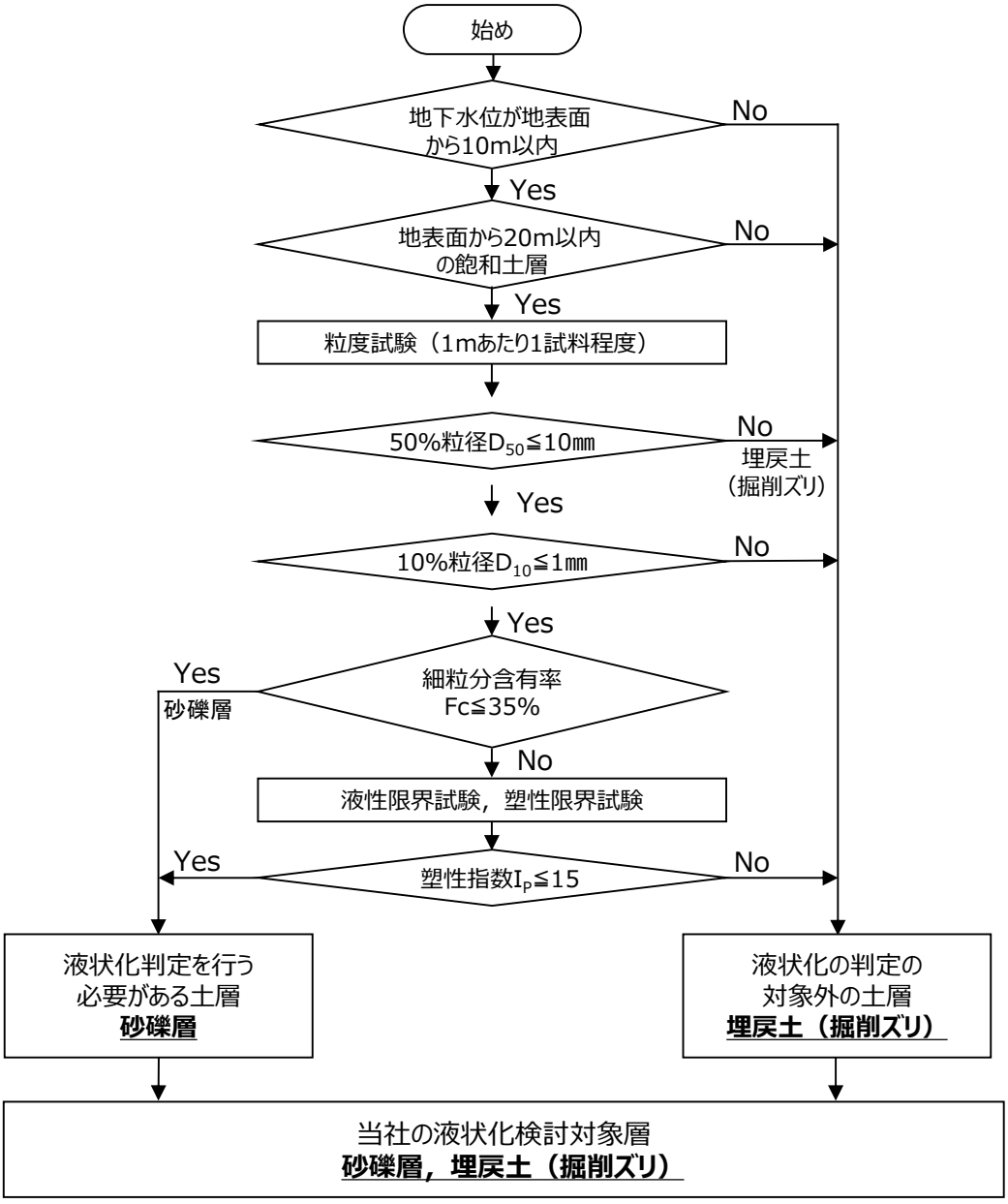
被覆石寸法（１，２号炉北側護岸）



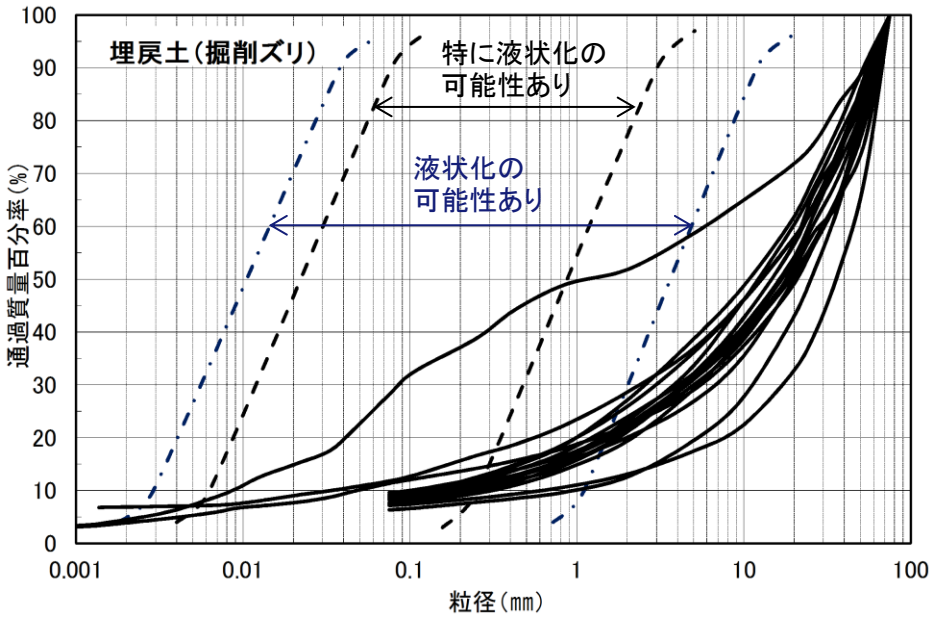
被覆石設置状況（１，２号炉北側護岸）

第2-13 図　被覆石の寸法及び設置状況

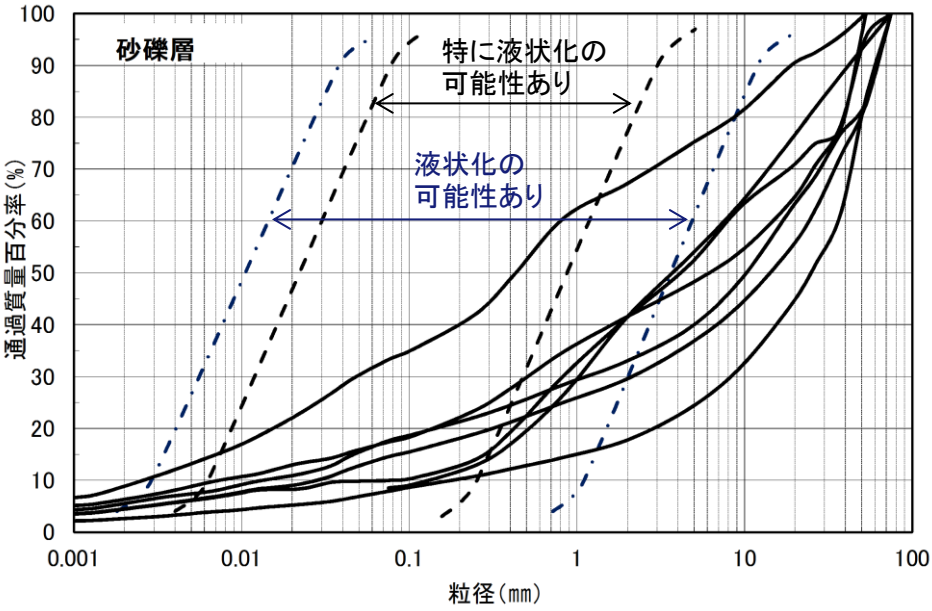
地層名	50%粒径（平均）（mm）	10%粒径（平均）（mm）	細粒分含有率（平均）（%）
埋戻土（掘削ズリ）	16.5	－	－
砂礫層	9.1	0.0651	15.6



第2-14 図　道路橋示方書に基づく抽出結果



埋戻土（掘削ズリ）の粒度による液状化判定



砂礫層の粒度による液状化判定

第2-15 図　港湾基準に基づく抽出結果

3. 液状化強度特性の網羅性，代表性

3.1　液状化試験試料採取位置とその代表性

3.1.1　液状化試験試料採取位置の選定

液状化試験試料の採取方法としては，先行他サイトの審査実績及び審査状況を踏まえると，ロータリー式三重管サンプラー，ＧＰサンプリング，凍結サンプリング及び表層試料採取の４種類（①～④）がある。各試料採取方法の概要及び試料採取結果等を以下に示す。

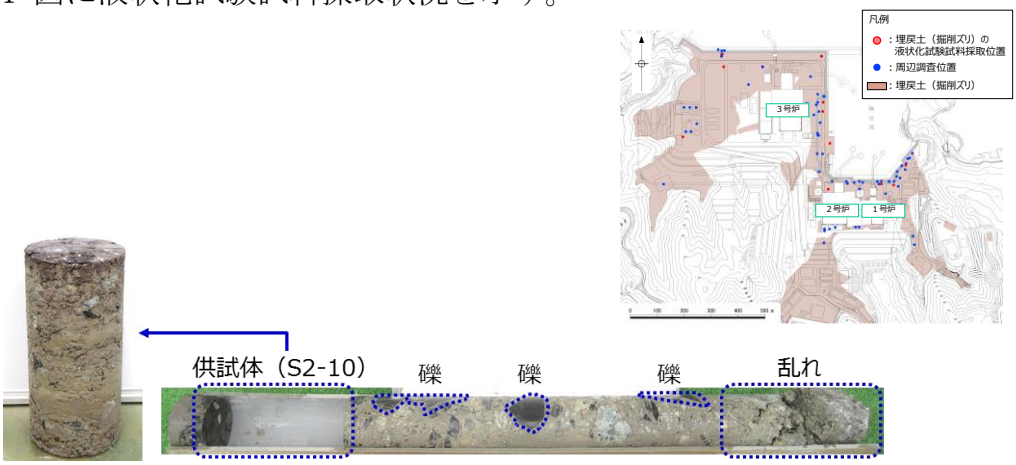
①ロータリー式三重管サンプラー

ロータリー式三重管サンプラーは，アウターチューブ，インナーチューブ及びライナーからなる三重管構造である。ボーリングロッドの回転がアウターチューブに伝わるがインナーチューブは回転しない機構を有しており，試料はインナーチューブ内側のライナーに収納される。乱れの少ない試料を採取できるサンプリング方法である。

埋戻土（掘削ズリ）の採取にあたり，ロータリー式三重管サンプラーにより試料採取（Φ88mm）を実施した。採取した試料は，局所的に発生する乱れを除いて乱れの少ない試料であった。一方，埋戻土（掘削ズリ）は150mm程度の玉石を伴うため，土の三軸試験の供試体作製・設置方法（JGS 0520），及び粗粒土の三軸試験の供試体作製・設置方法（JGS 0530）を踏まえると液状化試験に採用可能な区間は限定的であり，約110mの掘進長に対して供試体として使用可能なものは４体（約１m）であった。

土の三軸試験の供試体作製・設置方法（JGS 0520），及び粗粒土の三軸試験の供試体作製・設置方法（JGS 0530）に基づき，供試体直径がΦ300mmの場合，試料の最大粒径は60mm程度まで許容されるが，埋戻土（掘削ズリ）は150mm程度の玉石も含むことから，採取数（液状化試験に採用可能な供試体数）の改善は困難である。

第3-1-1 図に液状化試験試料採取状況を示す。



第3-1-1 図　Ｅ－２地点の液状化試験試料採取状況（供試体（S2-10）抜き出し後）

②ＧＰサンプリング

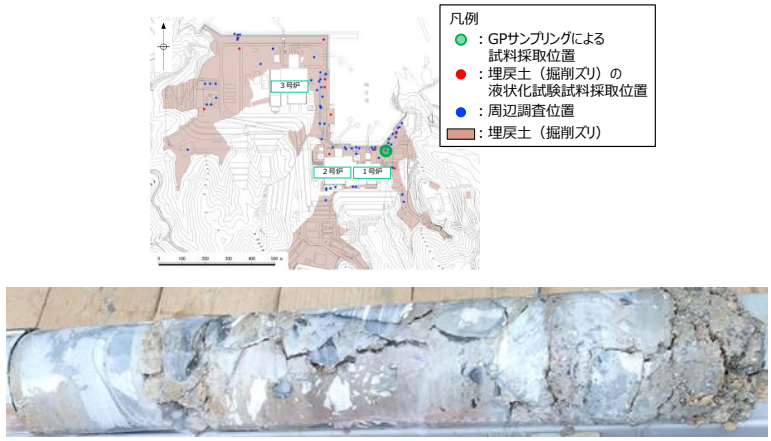
ＧＰサンプリングは，コアチューブの中にポリマー溶液を内封する単管構造である。サンプリング時に取り込んだ試料がポリマー溶液をサンプラー先端から押し出すことによりポリマー溶液が潤滑剤の役割を果たし，乱れの原因である試料とコアチューブとの摩擦を低減することにより，乱れの少ない試料を採取できるサンプリング方法である。

ロータリー式三重管サンプラーによる埋戻土（掘削ズリ）の採取に合わせ，１地点のみＧＰサンプリングにより試料採取（Φ100㎜）を実施したが，回転切削に伴う礫間の緩みによりコアが動いてコア詰まり（コアチューブ内のコアが自立せずに詰まる）を起こして掘進が不能となること，コアチューブ引き上げ時に掘削したコアがコアリフターをすり抜けて孔底に脱落することから，以降の試料採取を取り止めた。

また，採取されたコアは，掘進時に発生した不連続面に沿って乱れているもの，自立しないもので占められていたことから，供試体として採用可能なものは得られなかった。また，埋戻土（掘削ズリ）は150㎜程度の玉石を伴うため，土の三軸試験の供試体作製・設置方法（JGS 0520），及び粗粒土の三軸試験の供試体作製・設置方法（JGS 0530）を踏まえると液状化試験に採用可能な区間は限定的であった。

土の三軸試験の供試体作製・設置方法（JGS 0520），及び粗粒土の三軸試験の供試体作製・設置方法（JGS 0530）に基づき，供試体直径がΦ300㎜の場合，試料の最大粒径は60㎜程度まで許容されるが，埋戻土（掘削ズリ）は150㎜程度の玉石も含むことから，採取数（液状化試験に採用可能な供試体数）の改善は困難である。

第3-1-2図にＧＰサンプリングにより採取した埋戻土（掘削ズリ）を示す。



第3-1-2 図　ＧＰサンプリングにより採取した埋戻土（掘削ズリ）

③凍結サンプリング

凍結サンプリングは，原位置で地盤を凍結させ，その状態で試料を採取する方法であるため，乱れの少ない試料を採取できるサンプリング方法である。

凍結サンプリングの適用地盤は凍結に必要な飽和度の高い地盤であることから，埋戻土（掘削ズリ）のうち地下水位以浅の採取には適用不可と判断した。

乱れの少ない試料を採取した場合，埋戻土（掘削ズリ）は150㎜程度の玉石を伴うため，土の三軸試験の供試体作製・設置方法（JGS 0520），及び粗粒土の三軸試験の供試体作製・設置方法（JGS 0530）に基づき，液状化試験に採用可能な区間は限定的である。

④表層試料採取

表層試料採取は，地表付近の埋戻土（掘削ズリ）を対象として試料の採取を行う方法である。

採取した試料について，土の三軸試験の供試体作製・設置方法（JGS 0520），及び粗粒土の三軸試験の供試体作製・設置方法（JGS 0530）に準拠し，供試体寸法に対して適合しない礫を除くことにより，試験基準を満足する供試体を作製可能である。

敷地の被覆層（埋戻土（掘削ズリ））は敷地造成において発生した岩砕を主体とする材料により埋戻した人工地盤であることから，既往の埋戻土（掘削ズリ）の粒径加積曲線となるよう粒度調整を行った。また，敷地の埋立工事における施工管理基準値となるよう密度調整を行った。

今回,既往のロータリー式三重管サンプラー及びＧＰサンプリングによる採取実績を踏まえ，液状化試験データ数を確実に増やす観点から，表層試料採取により追加試料を採取した。

液状化試験試料採取方法及び採取結果を第3-1-1表に示す。

第3-1-1 表　液状化試験試料採取方法及び採取結果

	① ロータリー式 三重管サンプラー	② GPサンプリング	③ 凍結サンプリング	④ 表層試料採取
構造	三重管	単管（GP-D）	凍結管による地盤凍結	－
特徴	乱れの少ない試料を採取可能。	乱れの少ない試料を採取可能。	乱れの少ない試料を採取可能。	試料の寸法調整，粒度調整，密度調整が可能。
適用範囲	粘性土，砂質土，礫混り土	粘性土，砂質土，礫混り土	砂質土，礫混り土 ※凍結に必要な飽和度の高い地盤に適する。	表層に分布する試料
実施有無	○	○	× （適用不可のため実施しない）	○ （第730回審査会合以降，追加実施）
試料採取結果	約110mの掘進長に対して供試体として採用可能なものは4体（約1m）であった。 乱れの少ない試料を採取したが，埋戻土（掘削ズリ）は150mm程度の玉石も含むため試験に採用可能な区間は限定的であった。	掘進時にコア詰まり及びコアの脱落が発生した。 採取されたコアは，掘進時に発生した不連続面に沿って乱れているもの，自立しないもので占められていたことから，供試体として採用可能なものは得られなかった。	－	採取した試料の寸法調整により，試験基準に適合する供試体を作製した。 粒度調整，密度調整により，現地地盤を再現した供試体を作製した。
	供試体：4体	供試体：0体	－	供試体：10体

第3-1-3 図に敷地内の試料採取地点位置図を示す。

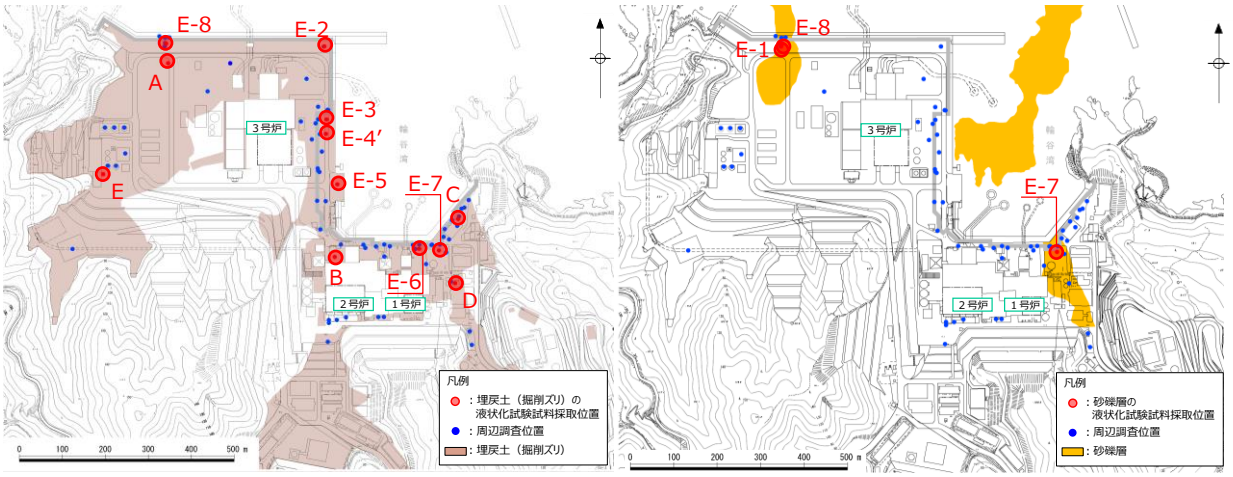
敷地内の液状化評価対象層として，埋戻土（掘削ズリ）及び砂礫層の分布状況から以下のとおり地点を選定し，試料を採取して液状化試験を実施する。

埋戻土（掘削ズリ）は３号炉西側から１，２号炉東側に広く分布している。このうち，地下水位以下で埋戻土（掘削ズリ）が厚く分布している護岸法線に沿った地点を広範囲に選定し，ロータリー式三重管サンプラーにより試料採取した（Ｅ－２～Ｅ－８）。なお，埋戻土（掘削ズリ）に対する液状化試験の位置及びデータ数について，代表性・網羅性の確保及び保守的な液状化強度の設定の観点から，これまで液状化試験データが得られていない位置を選定し，表層試料採取を追加実施した（Ａ～Ｅ）。

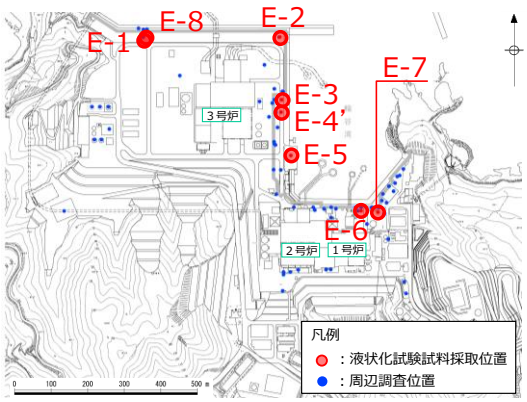
砂礫層は局所的に分布していることから，分布箇所である３号炉北側西端及び１，２号炉北側東端の地点を選定し，ロータリー式三重管サンプラーにより試料採取した（Ｅ－１，Ｅ－７，Ｅ－８）。

ロータリー式三重管サンプラーにより，地表から岩盤まで不攪乱試料の採取を実施した。供試体作製が可能な試料（巨礫の有無，必要高さ，自立性等）を確認し，液状化試験を実施した。

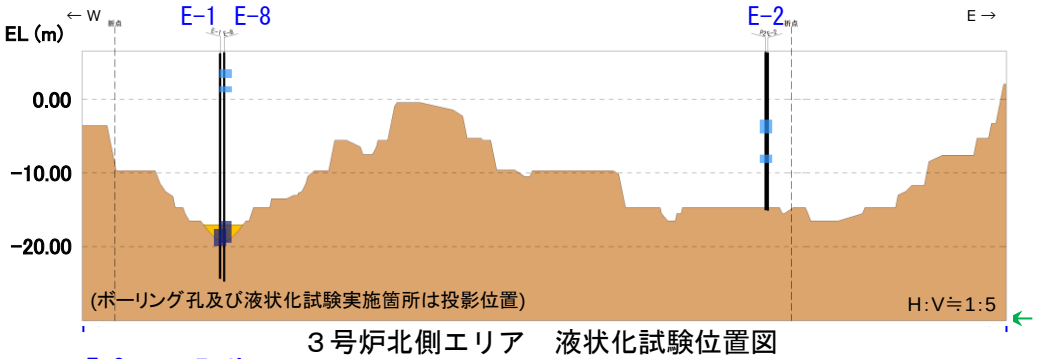
併せて，近傍においてボーリング調査を実施し，標準貫入試験及び粒度試験用の試料採取を実施した。ロータリー式三重管サンプラーによる液状化試験実施箇所を第3-1-4 図に示す。



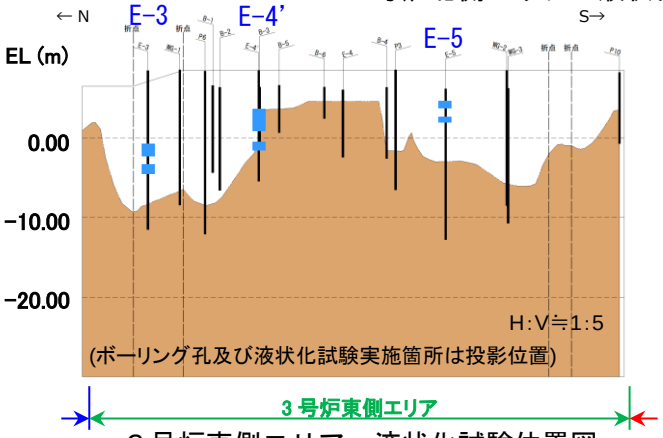
第3-1-3 図　試料採取地点位置図



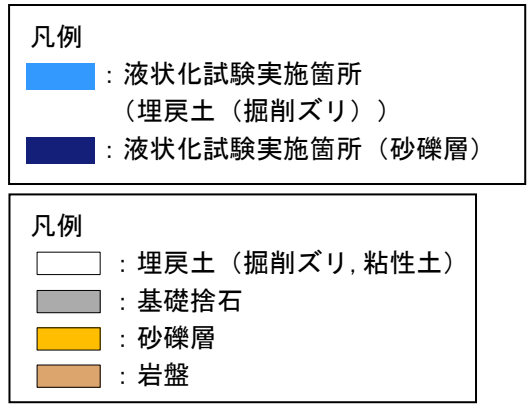
液状化試験箇所位置図（平面図）

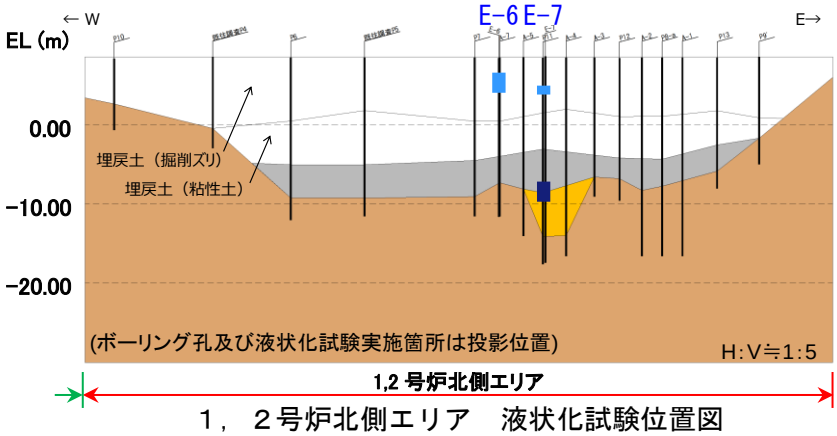


３号炉北側エリア　液状化試験位置図



３号炉東側エリア　液状化試験位置図





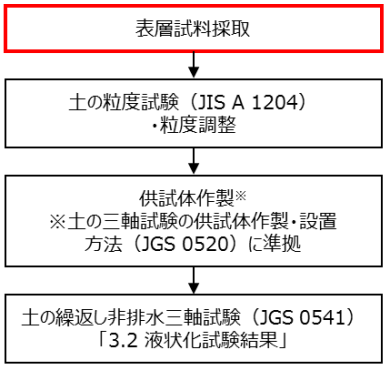
１，２号炉北側エリア　液状化試験位置図

第3-1-4 図　ロータリー式三重管サンプラーによる液状化試験実施箇所

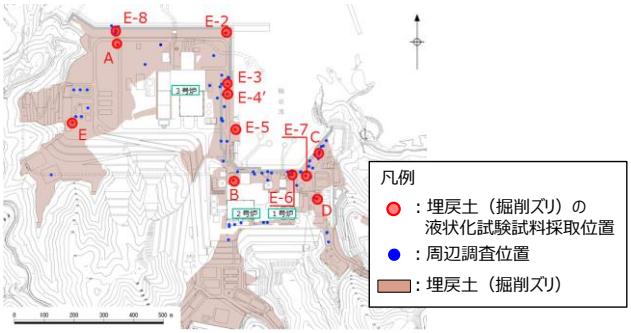
敷地の被覆層（埋戻土（掘削ズリ））は敷地造成において発生した岩砕を主体とする材料により埋戻した人工地盤であることから，埋戻土（掘削ズリ）の粒径加積曲線となるように粒度調整行い，敷地の埋立工事における施工管理基準値となるよう密度調整を行うことにより，人工地盤である敷地の被覆層（埋戻土（掘削ズリ））を再現した供試体を作製する。

路盤材以深の埋戻土（掘削ズリ）を対象として表層試料採取を実施した（A～E地点）。また，表層試料採取にあたり，巨礫を除いて採取した。

第 3-1-5 図に採取試料状況及び巨礫の例を示す。



表層採取試料による供試体作製方法



表層試料採取による液状化試験試料採取位置



採取試料状況（A地点）



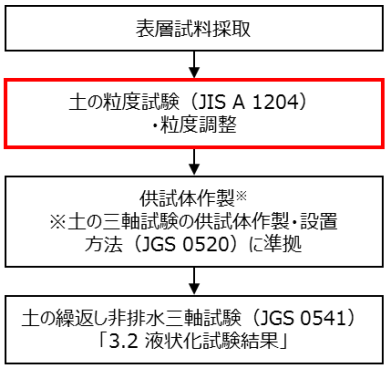
巨礫の例

第 3-1-5 図　採取状況及び巨礫の例

既往の試料採取位置の粒径加積曲線と同等になるよう，最大粒径 53mm として表層採取試料の粒度調整を実施した。粒度調整後の表層採取試料の粒径加積曲線及び細粒分含有率を第 3-1-6 図に示す。

表層採取試料の細粒分含有率の平均値は，既往の試料採取位置の細粒分含有率の平均値及び平均値-1σ値の範囲内である。

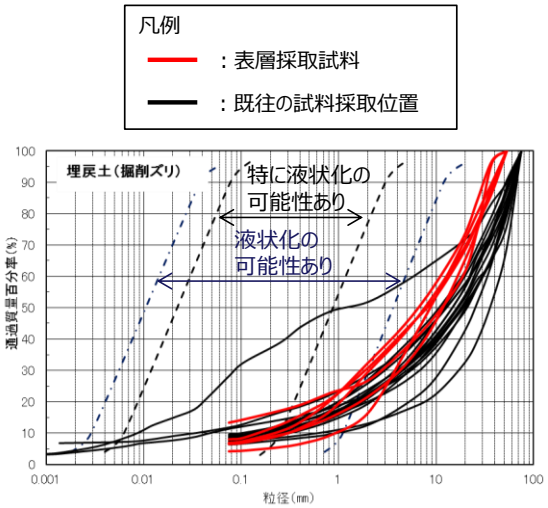
土の三軸試験の供試体作製・設置方法（JGS 0520）に基づき，表層採取試料による供試体を作製した。



表層採取試料による供試体作製方法

表層採取試料の細粒分含有率

	細粒分含有率（%）
A	6.6/6.5
B	13.3
C	4.2
D	8.0
E	6.9
平均値	7.6



表層採取試料の粒径加積曲線

液状化試験試料採取位置の細粒分含有率

	細粒分含有率（%）
平均値	9.8
平均値-σ	4.7

第 3-1-6 図　表層採取試料と既往の試料採取位置の粒径加積曲線及び細粒分含有率

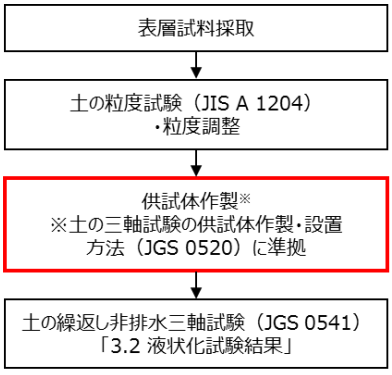
３号炉建設時の敷地の埋戻しに当たり，大型締固め試験により乾燥密度ρ_dを算出した（締固めエネルギー1.0E_cの乾燥密度ρ_d＝1.874g/cm^3）。乾燥密度ρ_d＝1.874g/cm^{3}を踏まえ，礫補正後乾燥密度ρ_d’＝1.95g/cm^{3}を算出し，施工管理基準値とした。

礫補正後乾燥密度とは，粒径53mm以下の材料を対象に実施した大型締固め試験結果に対し，53mm以上の礫を含む実際の埋戻土（掘削ズリ）の乾燥密度を算出するための補正である。したがって，表層採取試料の最大粒径は53mmであることから，表層採取試料による供試体作製に当たっては，乾燥密度ρ_d＝1.874g/cm^{3}を目標値とした。

供試体作製は，土の三軸試験の供試体作製・設置方法（JGS 0520）に準拠して実施した。試料を５層に分けてモールド（直径100mm）に入れ，静的締固め法により作製した。

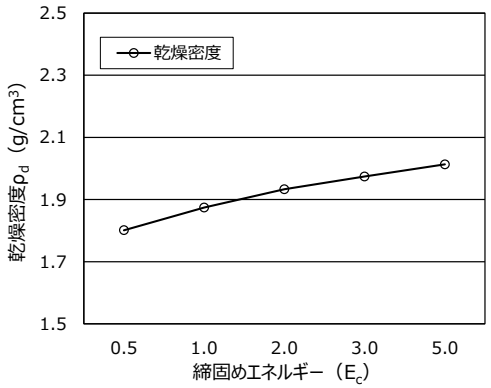
以上の方法により表層採取試料による供試体を作製し，土の繰返し非排水三軸試験方法（JGS 0541）を実施した。

第 3-1-7 図に表層採取試料による供試体の乾燥密度を示す。



表層採取試料による供試体作製方法

締固めエネルギー（E_c）	0.5	1.0	2.0	3.0	5.0
乾燥密度ρ_d（g/cm^3）	1.801	1.874	1.933	1.974	2.013



締固めエネルギーと乾燥密度の関係図

表層採取試料による供試体の乾燥密度

	乾燥密度（g/cm^3）		乾燥密度（g/cm^3）
A①	1.866	C②	1.873
A②	1.877	C③	1.873
B①	1.868	C④	1.877
B②	1.871	D①	1.872
C①	1.875	E①	1.875

第 3-1-7 図　表層採取試料による供試体の乾燥密度

3.1.2　液状化試験試料採取位置の代表性確認

液状化試験試料採取位置における基本物性（粒径加積曲線，Ｎ値・細粒分含有率）について，第3-1-8～17 図に示す。

液状化試験試料採取位置の代表性確認を目的に，液状化試験試料採取位置と周辺調査位置を含めた敷地全体との比較，検討を行った。比較する指標としては，Ｎ値，細粒分含有率を選定する。第3-1-2 表に各基準類における液状化強度比R_L と基本物性の相関性を示す。

Ｎ値は，各基準類の液状化判定における液状化強度比R_L の算定式がいずれもＮ値をパラメータとした式であり，また，有効応力解析（ＦＬＩＰ）の簡易設定法にＮ値がパラメータとして用いられており，液状化強度比R_Lとの相関が最も高いと考えられることから，指標として選定する。

細粒分含有率は，各基準類の液状化判定における液状化強度比R_L の算定式において，液状化強度比R_Lを補正するパラメータとして用いられており，液状化強度比R_Lとの相関が高いと考えられることから，指標として選定する。

Ｅ－２～Ｅ－８の埋戻土層の基本物性に関する評価は以下のとおり。

【Ｅ－２の埋戻土（掘削ズリ）】

・Ｅ－２は３号炉北側エリアのEL.＋6.5m盤上の地点であり，地表面から岩盤（約EL.－15m）まではすべて埋戻土（掘削ズリ）である。
・Ｅ－２の埋戻土（掘削ズリ）の粒度分布について，D_{50}は10mm以上となっており，道路橋示方書及び港湾基準のいずれにおいても液状化の判定を行う必要がある土層には該当しない。
・Ｎ値は概ね20程度である。また，細粒分含有率は概ね10％程度である。

【Ｅ－３の埋戻土（掘削ズリ）】

・Ｅ－３は３号炉東側エリアのEL.＋8.5m盤上の地点であり，地表面から岩盤（約EL.－10m）まではすべて埋戻土（掘削ズリ）である。
・Ｅ－３の埋戻土（掘削ズリ）の粒度分布について，D_{50}は10mm以上となっており，道路橋示方書及び港湾基準のいずれにおいても液状化の判定を行う必要がある土層には該当しない。
・Ｎ値は概ね20程度である。また，細粒分含有率は概ね10％程度である。

【 Ｅ－４’の埋戻土（掘削ズリ）】

・Ｅ－４’は３号炉東側エリアのEL.＋8.5m盤上の地点であり，地表面から岩盤（約EL.0m）まではすべて埋戻土（掘削ズリ）である。
・Ｅ－４’の埋戻土（掘削ズリ）の粒度分布は， D_{50}は10mm以上となっており，道路橋示方書及び港湾基準のいずれにおいても液状化の判定を行う必要がある土層には該当しない。
・Ｎ値は概ね30程度である。また，細粒分含有率は概ね10％程度である。

【Ｅ－５の埋戻土（掘削ズリ）】
・Ｅ－５は３号炉東側エリアのEL.＋6.0m盤上の地点であり，地表面から岩盤（約EL.－３m）まではすべて埋戻土（掘削ズリ）である。
・Ｅ－５の埋戻土（掘削ズリ）の粒度分布は，D_{50}は10mm以上となっており，道路橋示方書及び港湾基準のいずれにおいても液状化の判定を行う必要がある土層には該当しない。
・Ｎ値は概ね10程度である。また，細粒分含有率は概ね10％程度である。

【Ｅ－６の埋戻土（掘削ズリ）】
・Ｅ－６は１，２号炉北側エリアのEL.＋8.5m盤上の地点であり，地表面から岩盤（約EL.－10m）にかけて，上から順に埋戻土（掘削ズリ），埋戻土（粘性土），基礎捨石が存在する。
・そのうち，Ｅ－６の埋戻土（掘削ズリ）の粒度分布は，D_{50}は10mm以上となっており，道路橋示方書及び港湾基準のいずれにおいても液状化の判定を行う必要がある土層には該当しない。
・Ｎ値は概ね20程度である。また，細粒分含有率は概ね10％程度である。

【Ｅ－７の埋戻土（掘削ズリ）】
・Ｅ－７は１，２号炉北側エリアのEL.＋8.5m盤上の地点であり，地表面から岩盤（約EL.－10m）にかけて，上から順に埋戻土（掘削ズリ），埋戻土（粘性土），基礎捨石，砂礫層が存在する。
・そのうち，Ｅ－７の埋戻土（掘削ズリ）の粒度分布は，港湾基準において，液状化の可能性がある土層には該当しない。
また，D_{50}は10mm以下，D_{10}は１mm以下であるが，I_Pが15以上であるため，道路橋示方書において液状化の判定を行う必要がある土層には該当しない。
・Ｎ値は概ね10程度である。また，細粒分含有率は概ね10％程度である。

【Ｅ－８の埋戻土（掘削ズリ）】
・Ｅ－８は３号炉北側エリアのEL.＋6.5m盤上の地点であり，地表面から岩盤（約EL.－20m）にかけて，上方に埋戻土（掘削ズリ）が存在し，岩盤上に厚さ最大5m程度の砂礫層が存在する。
・そのうち，Ｅ－８の埋戻土（掘削ズリ）の粒度分布は，D_{50}は10mm以上となっており，道路橋示方書及び港湾基準のいずれにおいても液状化の判定を行う必要がある土層には該当しない。
・Ｎ値は概ね20程度である。また，細粒分含有率は概ね10％程度である。

次に，砂礫層の基本物性に関する評価は以下のとおり。

【Ｅ－１の砂礫層】
・Ｅ－１は３号炉北側エリアのEL.＋6.5m盤上の地点であり，地表面から岩盤（約EL.－20m）にかけて，上方に埋戻土（掘削ズリ）が存在し，岩盤上に厚さ最大5m程度の砂礫層が存在する。
・そのうち，Ｅ－１の砂礫層の粒度分布は，港湾基準において，液状化の可能性がある土層には該当しない。
また，D_{50}が10mm以下，D_{10}が１mm以下及び細粒分含有率が35％以下である試料があるため,道路橋示方書において液状化の判定を行う必要がある土層に該当する。
・Ｎ値は概ね20程度である。また，細粒分含有率は概ね20％程度である。

【Ｅ－７の砂礫層】
・Ｅ－７は１，２号炉北側エリアのEL.＋8.5m盤上の地点であり，地表面から岩盤（約EL.－10m）にかけて，上から順に埋戻土（掘削ズリ），埋戻土（粘性土），基礎捨石，砂礫層が存在する。
・そのうち，Ｅ－７の砂礫層の粒度分布は，港湾基準において，液状化の可能性がある土層には該当しない。
また，D_{50}が10mm以下，D_{10}が１mm以下及び細粒分含有率が35％以下である試料があるため,道路橋示方書において液状化の判定を行う必要がある土層に該当する。
・Ｎ値は概ね10程度である。また，細粒分含有率は概ね10％程度である。

【Ｅ－８の砂礫層】
・Ｅ－８は３号炉北側エリアのEL.＋6.5m盤上の地点であり，地表面から岩盤（約EL.－20m）にかけて，上方に埋戻土（掘削ズリ）が存在し，岩盤上に厚さ最大5m程度の砂礫層が存在する。
・そのうち，Ｅ－８の砂礫層の粒度分布は，港湾基準において，液状化の可能性がある土層には該当しない。
また，D_{50}が10mm以下，D_{10}が１mm以下及び細粒分含有率が35％以下である試料があるため,道路橋示方書において液状化の判定を行う必要がある土層に該当する。
・Ｎ値は概ね20程度である。また，細粒分含有率は概ね20％程度とばらつきが大きい。

各基準における設計で設定する地盤物性値のばらつきに対する考え方は,「地盤工学会基準 JGS 4001：性能設計概念に基づいた基礎構造物等に関する設計原則（2006)」や「港湾基準」,「道路橋示方書」によると,平均値を原則とし，ばらつきを考慮する場合は変動係数等などに応じて設定するという考え方が示されている。

液状化試験試料採取位置と周辺調査位置を含めた敷地全体とのN値等の比較に際しては，各基準における地盤物性値のばらつきに対する考え方を参考に,「平均値」及び平均値から標準偏差σを減じた「平均値-1σ（以下「-1σ値」という)」について整理した。

第3-1-3 表に各基準類における地盤物性値のばらつきに対する考え方を示す。

【地盤工学会基準 JGS 4001：性能設計概念に基づいた基礎構造物等に関する設計原則（2006)】

・設計に用いる「特性値」の決定にあたっては，過去の経験にもとづき，地盤パラメータのばらつきや単純化したモデルの適用性に十分留意しなければならない。
・この特性値は，原則として導出値の平均値（期待値）である。この平均値は単なる機械的な平均値ではなく，統計的な平均値の推定誤差を勘案したものでなければならない。
・特性値を示すにあたっては，地盤の特性を記述するために，特性値に加えて，導出値のばらつきの指標（たとえば標準誤差や変動係数）を含めることが望ましい。

【港湾基準】

・性能照査に用いる地盤定数の設計用値は，原則として地盤工学会基準 JGS 4001に基づき，推定する。
・地盤定数の代表値である特性値は，データ数が十分かつ導出値のばらつきが小さい場合には，原則として導出値の平均値をもって算定することができる。ただし，データ数が不足している場合（10個未満）及び導出値のばらつきが大きい場合には,導出値の平均値を補正したうえで,特性値を設定する必要がある。
・特性値は，導出値のばらつきに関する補正係数b1を標準偏差として定義される変動係数に応じて設定することにする。

【道路橋示方書】

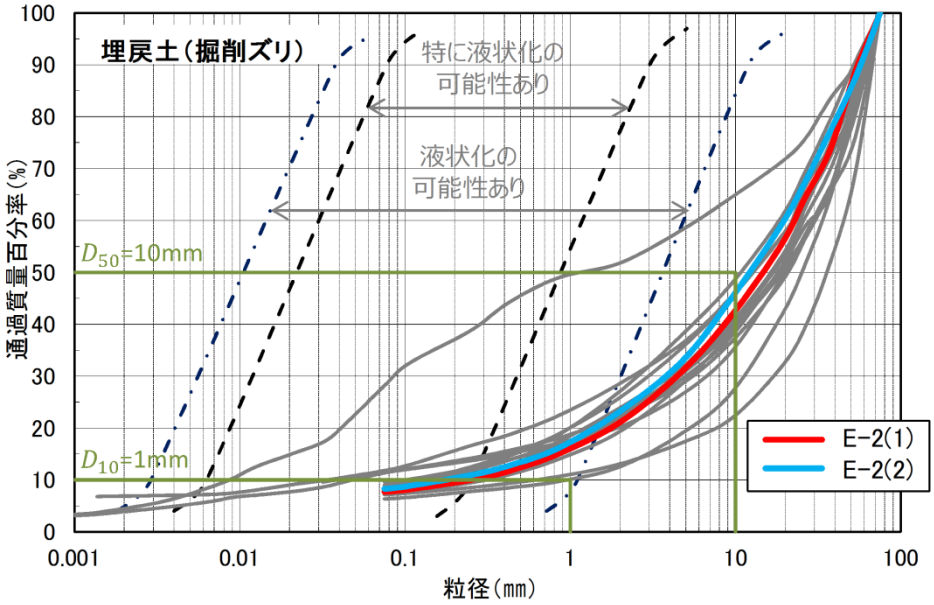
・地盤は複雑でばらつきの大きい材料であるが，設計に用いる地盤定数は，基礎に作用する荷重に対して，その条件下で最も高い確率で起こり得る基礎の挙動を推定するものである。したがって，地盤定数は，計算式の精度や特性を考慮したうえで，当該地盤の平均的な値と考えられるものを求めることが原則である。
・自然地盤から得られる計測データは多様で，しかもばらつくのが普通である。

データのばらつきだけでなく，データ数を合理的に評価して設計に用いる地盤定数を定める必要がある。

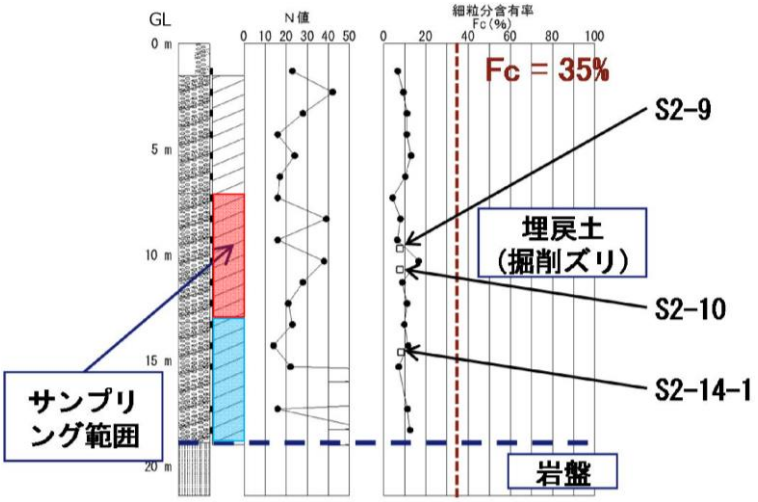
液状化試験を実施した箇所のうち，埋戻土（掘削ズリ）及び砂礫層の液状化試験試料採取位置と周辺調査位置を含めた敷地全体や防波壁近傍におけるＮ値や物理特性（細粒分含有率）の比較を行い，代表性を確認した。第3-1-18 図に比較対象位置図を，第3-1-19 図に各土層の基本物性の比較結果を示す。なお，各種試験は，JIS に基づき実施した。

Ｅ－２～Ｅ－８地点の埋戻土（掘削ズリ）は，敷地全体と比べて，Ｎ値及び細粒分含有率ともに，液状化試験試料採取位置の平均値及び-1σ値が，敷地全体のばらつき（±1σ）の範囲内であることから，液状化試験試料採取位置は代表性を有していると評価した。また，埋戻土（掘削ズリ）は敷地全体に分布するため，場所によって埋戻土（掘削ズリ）の性状が異なる懸念があることから，敷地の広範囲にわたって設置された防波壁に着目して，液状化試験試料採取位置と３つの構造形式の防波壁近傍の基本物性を比較したところ，Ｎ値及び細粒分含有率ともに，液状化試験試料採取位置の平均値が，防波壁近傍のばらつき（±1σ）の範囲内であることから，液状化試験試料採取位置は代表性を有していると評価した。

Ｅ－１，Ｅ－７，Ｅ－８地点の砂礫層の細粒分含有率は，液状化試験試料採取位置の平均値及び-1σ値が，敷地全体のばらつき（±1σ）の範囲内であった。また，Ｎ値は，液状化試験試料採取位置の平均値は敷地全体のばらつき（±1σ）の範囲内であり，液状化試験試料採取位置の-1σ値は敷地全体のばらつき（±1σ）の範囲から僅かに外れているものの概ね一致していることから，液状化試験試料採取位置は代表性を有していると評価した。なお，砂礫層は敷地の局所的な範囲で確認されており，液状化試験試料採取位置と敷地全体の調査位置とは近接している。



Ｅ－２地点の液状化試験試料の粒径加積曲線

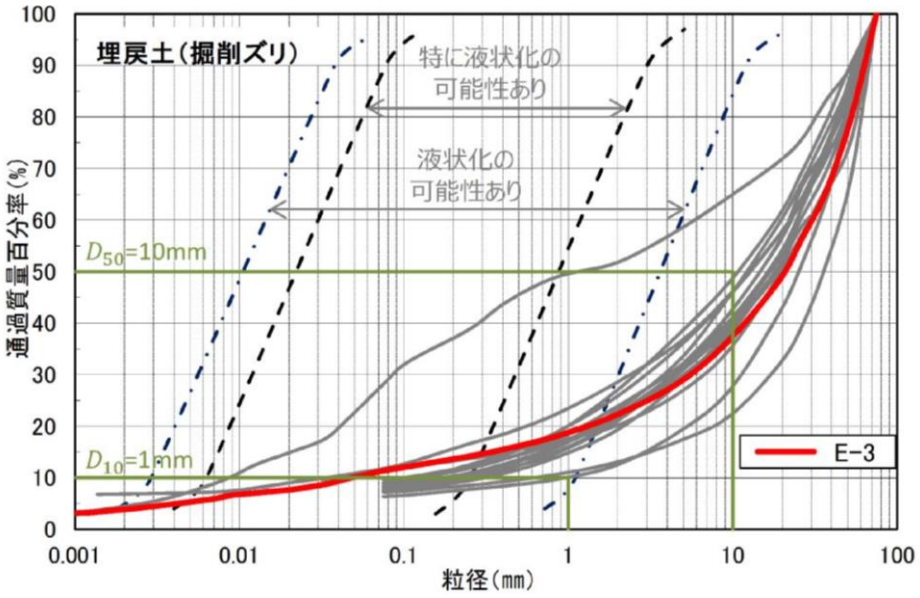


細粒分含有率：粒度0.075mm未満の土粒子の質量百分率

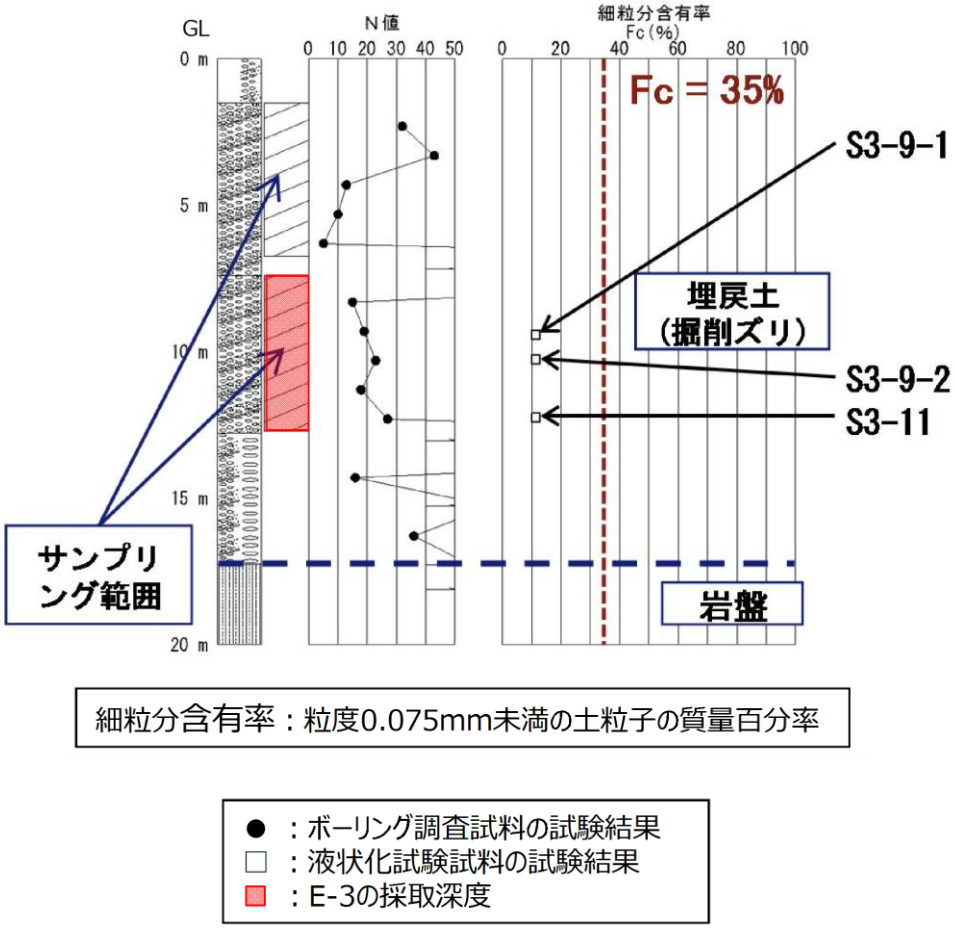
●　：ボーリング調査試料の試験結果
□　：液状化試験試料の試験結果
：E-2(1)の採取深度
：E-2(2)の採取深度

Ｅ－２地点のボーリング調査試料及び液状化試験試料の試験結果

第 3-1-8 図　液状化試験試料採取位置の基本物性（Ｅ－２の埋戻土（掘削ズリ））

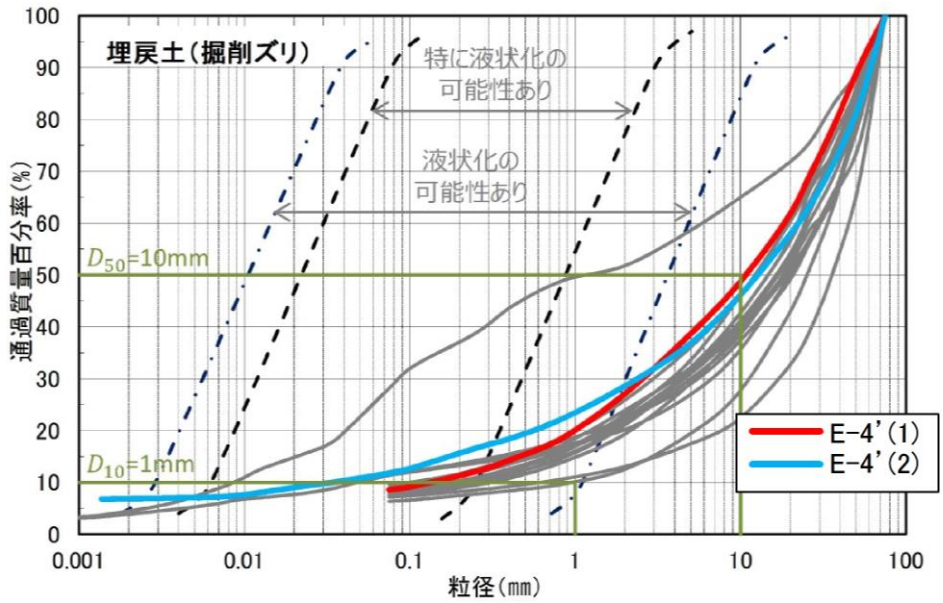


Ｅ－３地点の液状化試験試料の粒径加積曲線

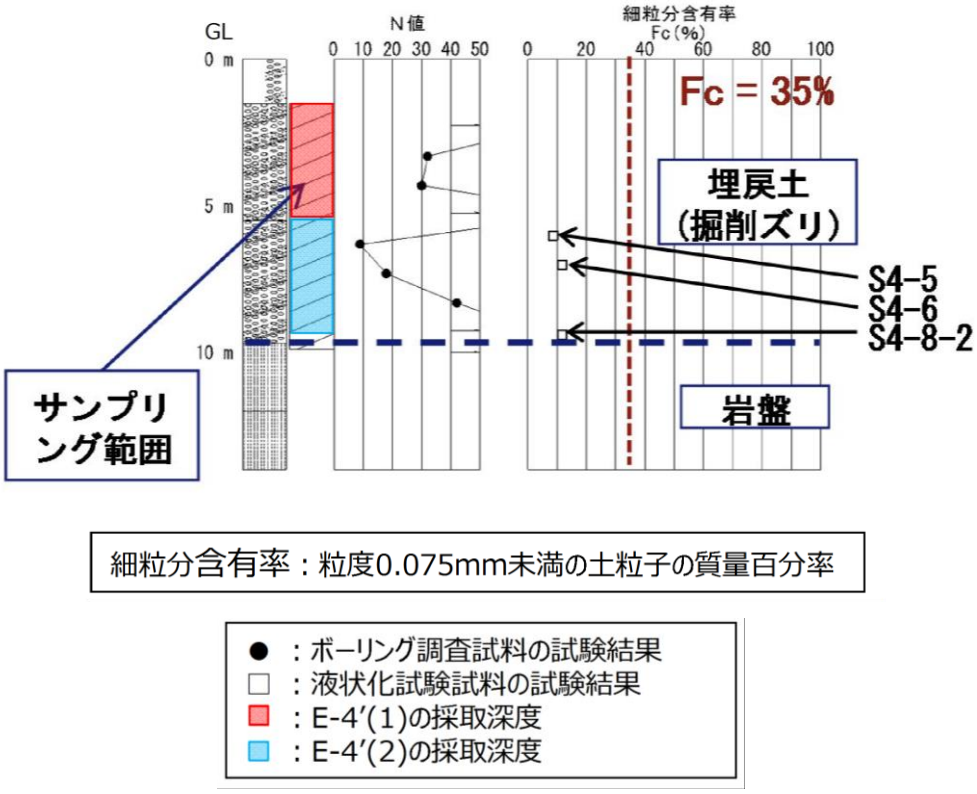


Ｅ－３地点のボーリング調査試料及び液状化試験試料の試験結果

第 3-1-9 図　液状化試験試料採取位置の基本物性（Ｅ－３の埋戻土（掘削ズリ））

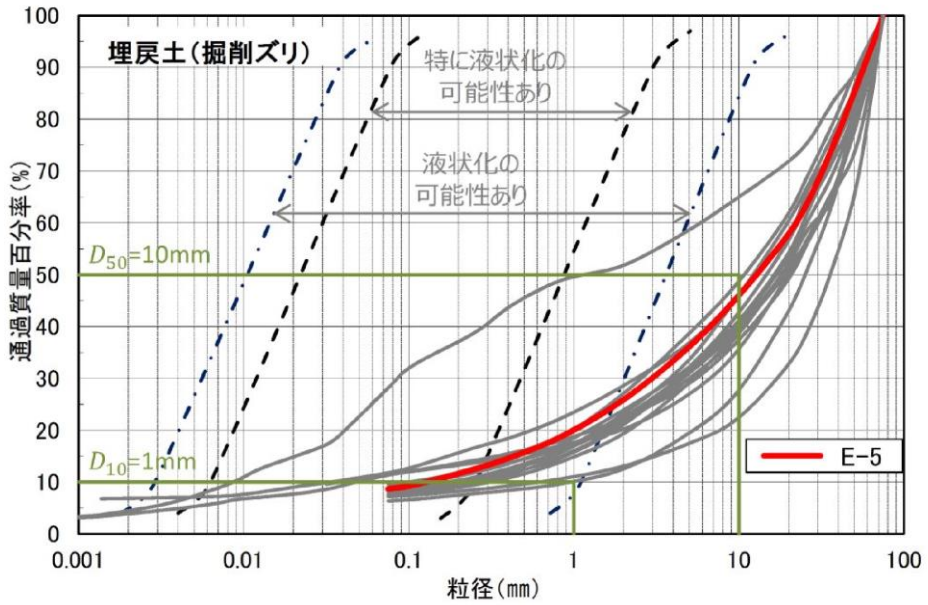


Ｅ－４’地点の液状化試験試料の粒径加積曲線

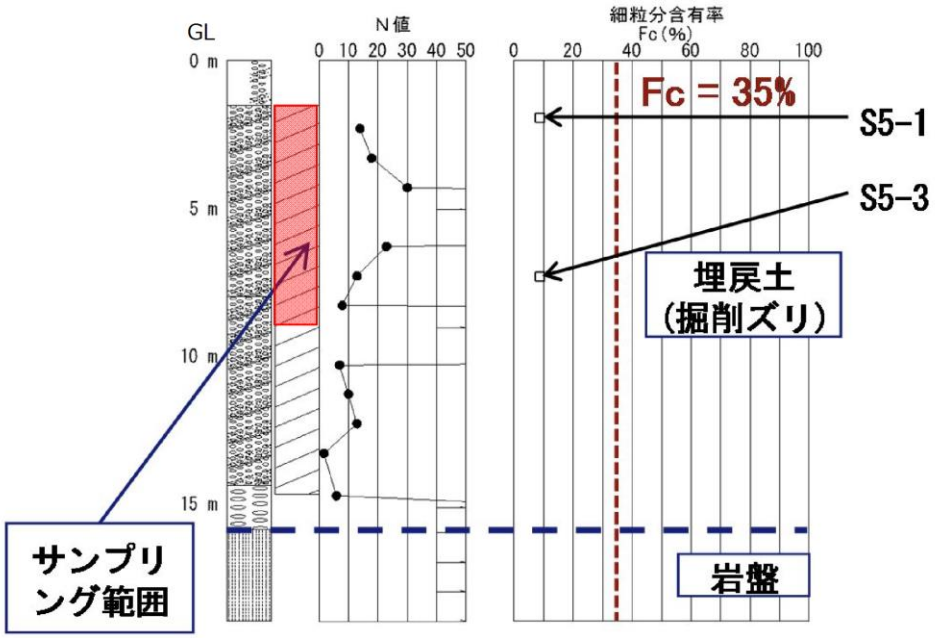


Ｅ－４’地点のボーリング調査試料及び液状化試験試料の試験結果

第 3-1-10 図　液状化試験試料採取位置の基本物性（Ｅ－４’の埋戻土（掘削ズリ））

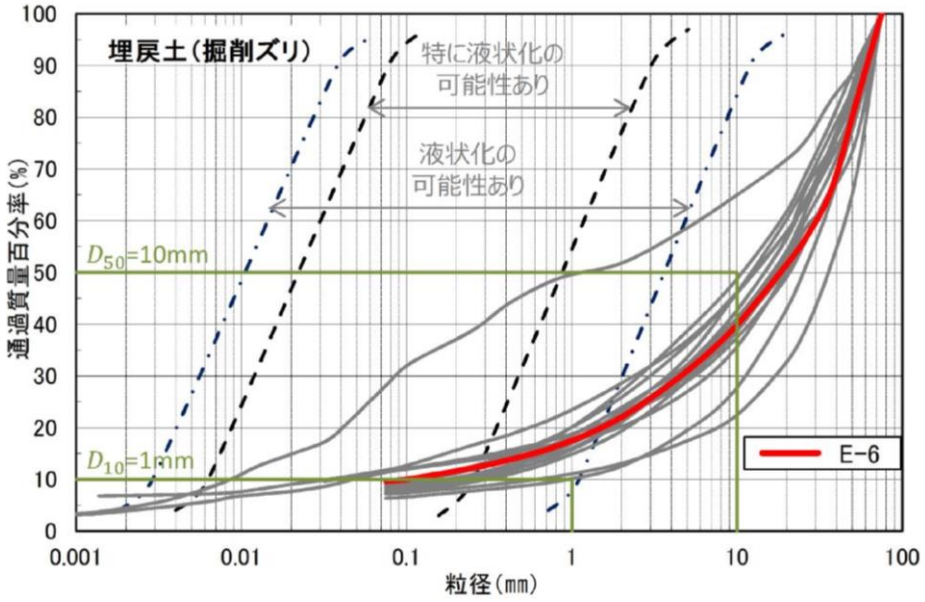


Ｅ－５地点の液状化試験試料の粒径加積曲線

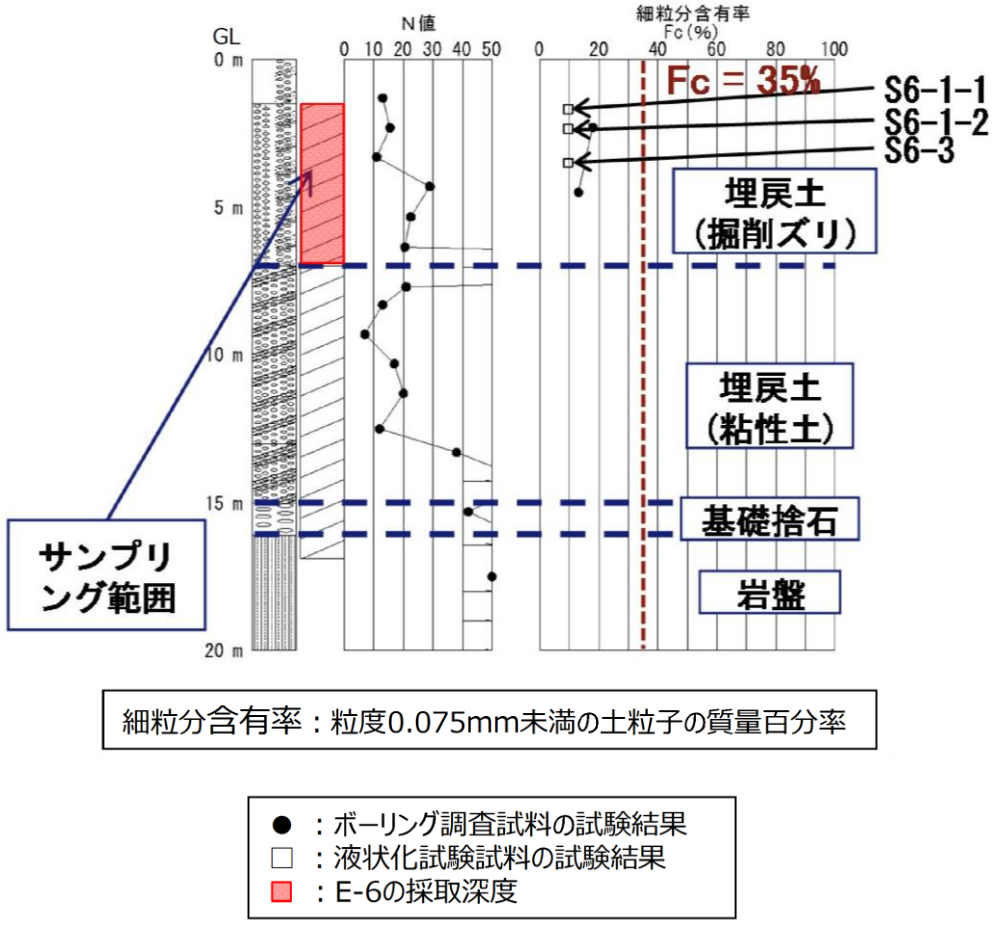


Ｅ－５地点のボーリング調査試料及び液状化試験試料の試験結果

第 3-1-11 図　液状化試験試料採取位置の基本物性（Ｅ－５の埋戻土（掘削ズリ））

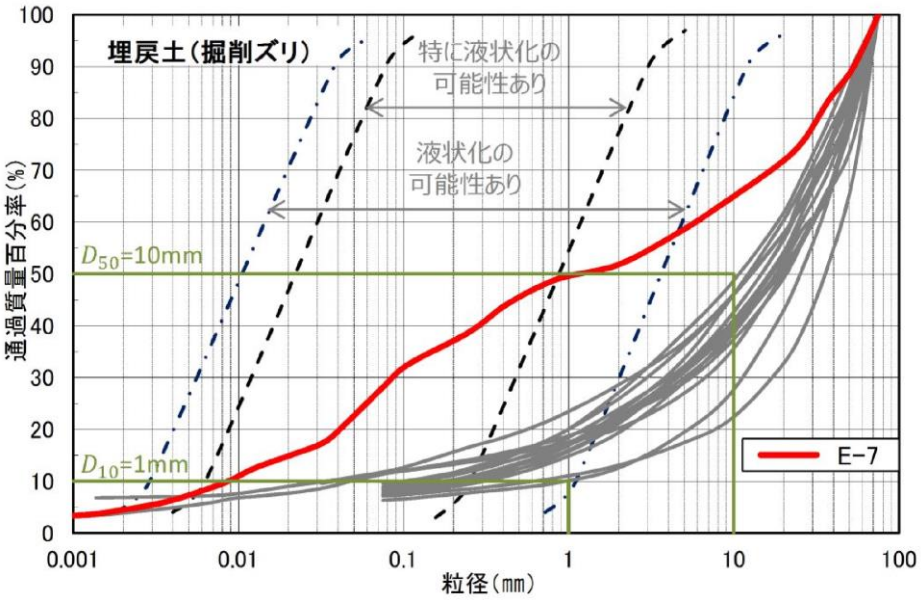


Ｅ－６地点の液状化試験試料の粒径加積曲線

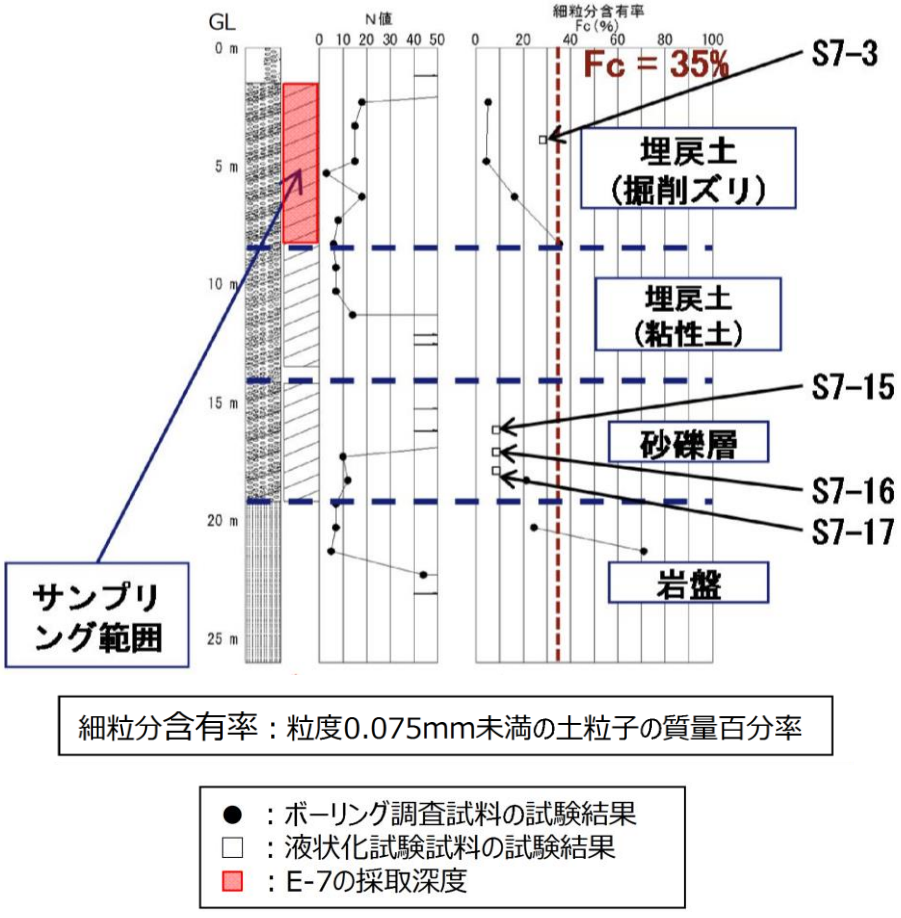


Ｅ－６地点のボーリング調査試料及び液状化試験試料の試験結果

第 3-1-12 図　液状化試験試料採取位置の基本物性（Ｅ－６の埋戻土（掘削ズリ））

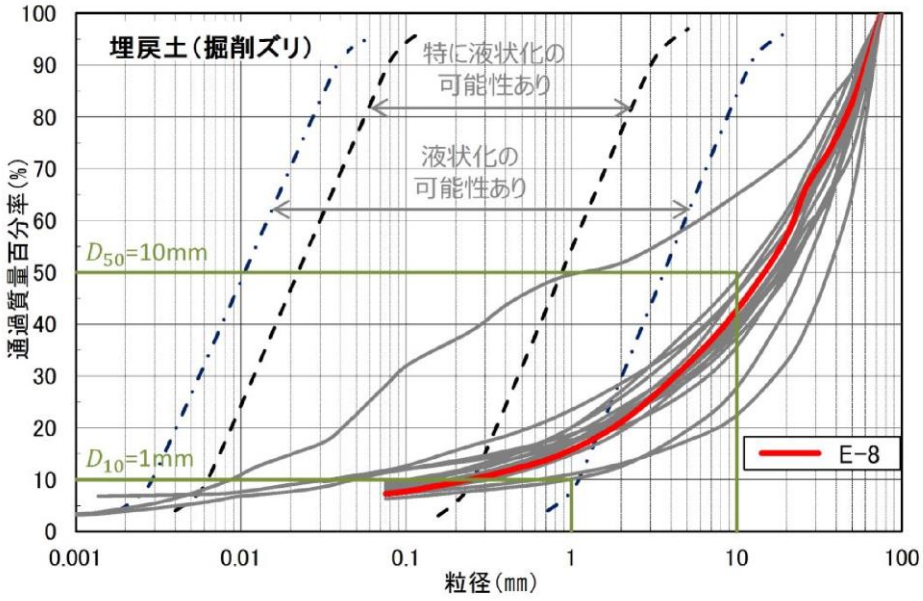


Ｅ－７地点の液状化試験試料の粒径加積曲線

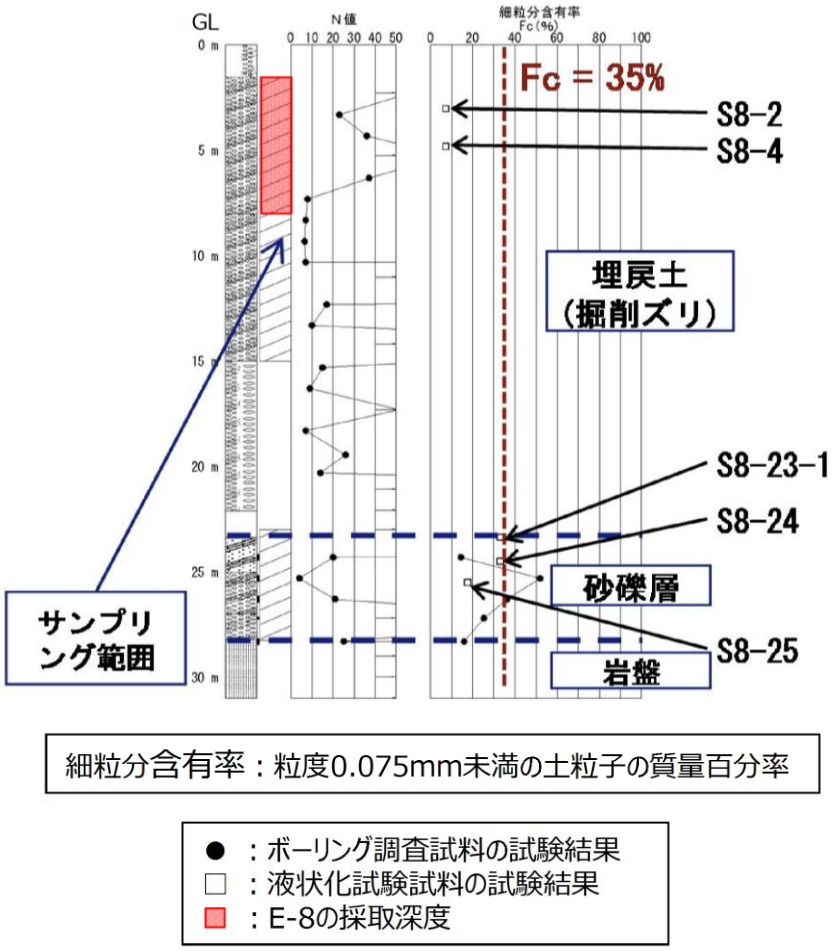


Ｅ－７地点のボーリング調査試料及び液状化試験試料の試験結果

第 3-1-13 図　液状化試験試料採取位置の基本物性（Ｅ－７の埋戻土（掘削ズリ））

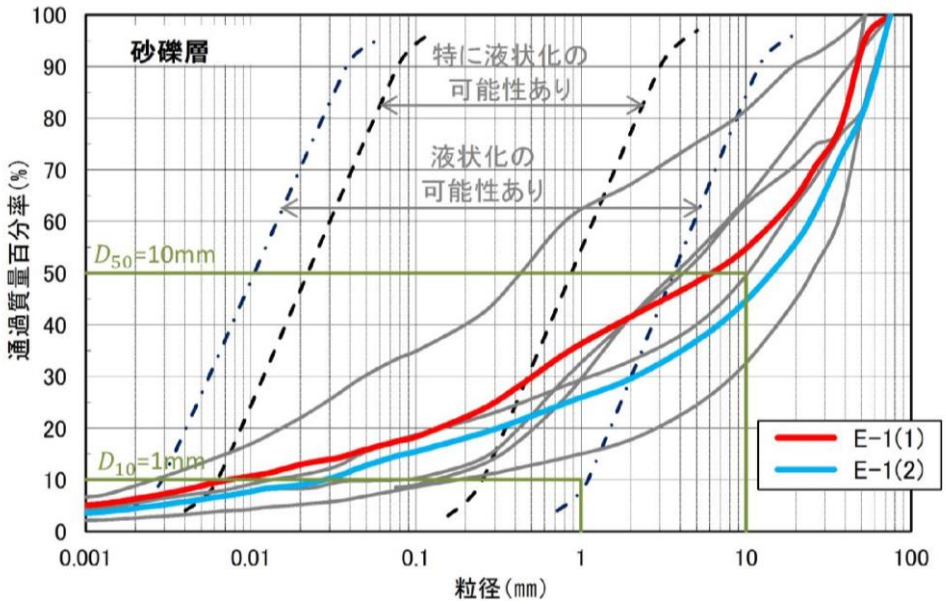


Ｅ－８地点の液状化試験試料の粒径加積曲線

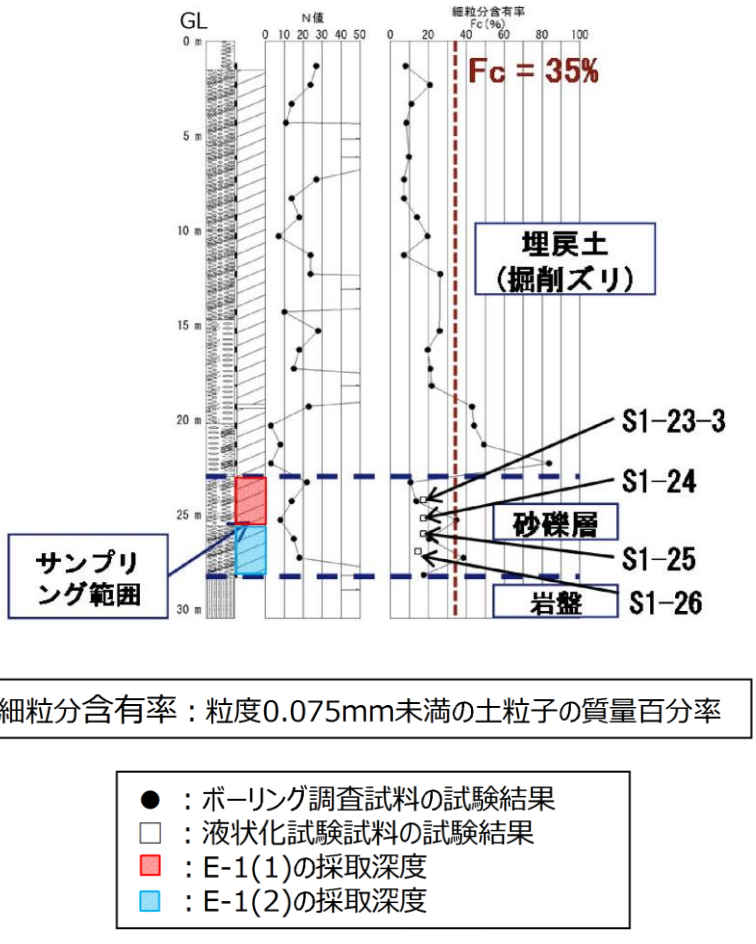


Ｅ－８地点のボーリング調査試料及び液状化試験試料の試験結果

第 3-1-14 図　液状化試験試料採取位置の基本物性（Ｅ－８の埋戻土（掘削ズリ））

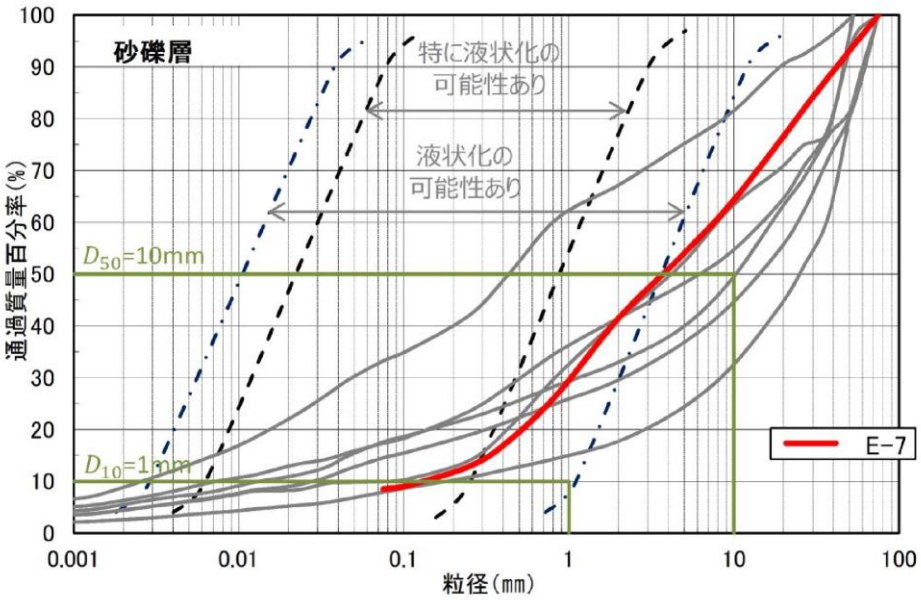


Ｅ－１地点の液状化試験試料の粒径加積曲線

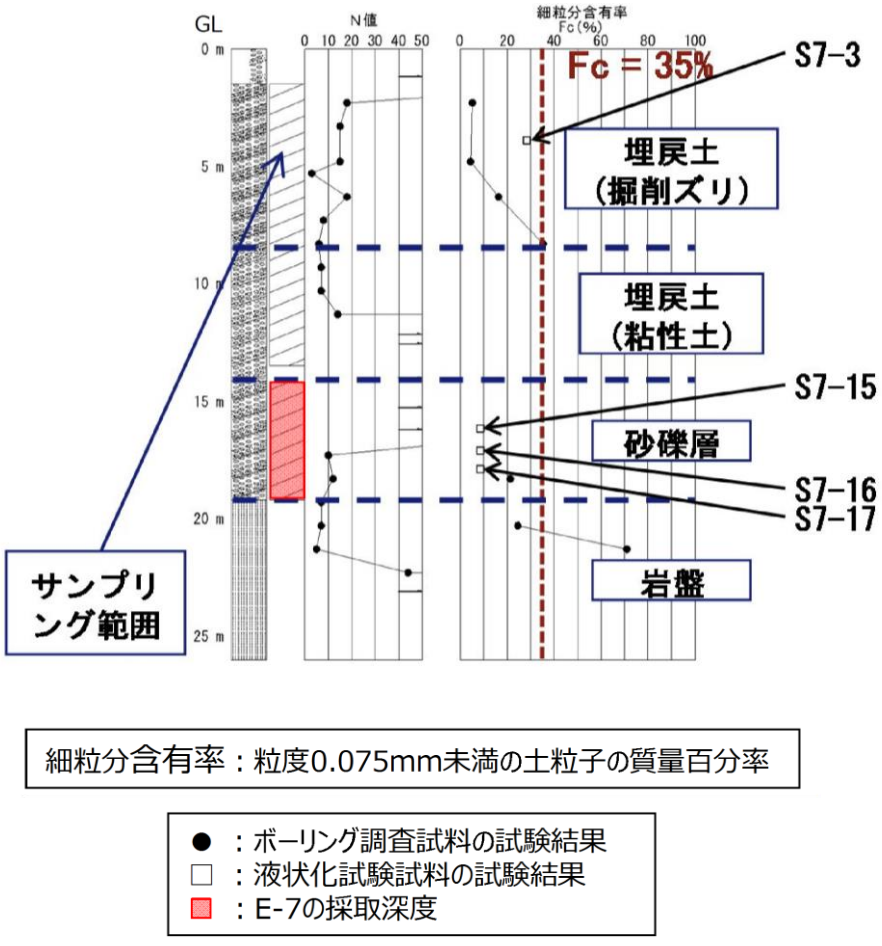


Ｅ－１地点のボーリング調査試料及び液状化試験試料の試験結果

第 3-1-15 図　液状化試験試料採取位置の基本物性（Ｅ－１の砂礫層）

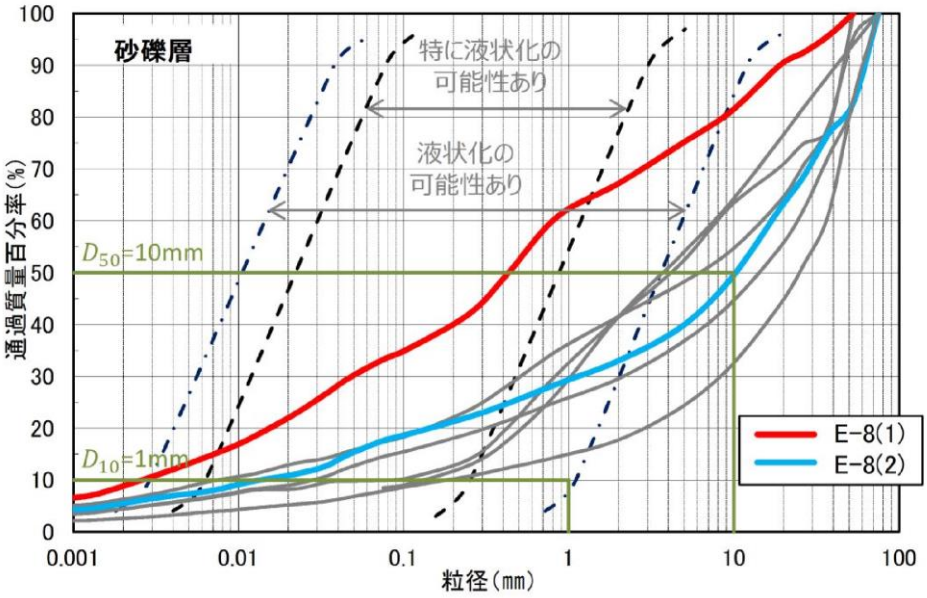


Ｅ－７地点の液状化試験試料の粒径加積曲線

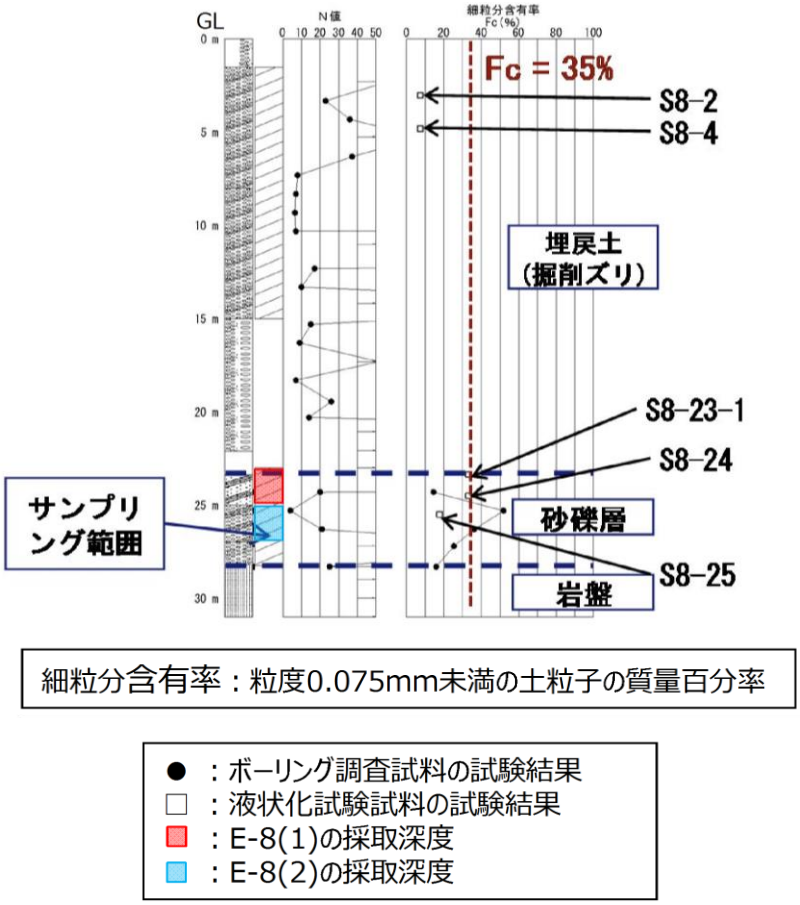


Ｅ－７地点のボーリング調査試料及び液状化試験試料の試験結果

第 3-1-16 図　液状化試験試料採取位置の基本物性（Ｅ－７の砂礫層）



Ｅ－８地点の液状化試験試料の粒径加積曲線



Ｅ－８地点のボーリング調査試料及び液状化試験試料の試験結果

第 3-1-17 図　液状化試験試料採取位置の基本物性（Ｅ－８の砂礫層）

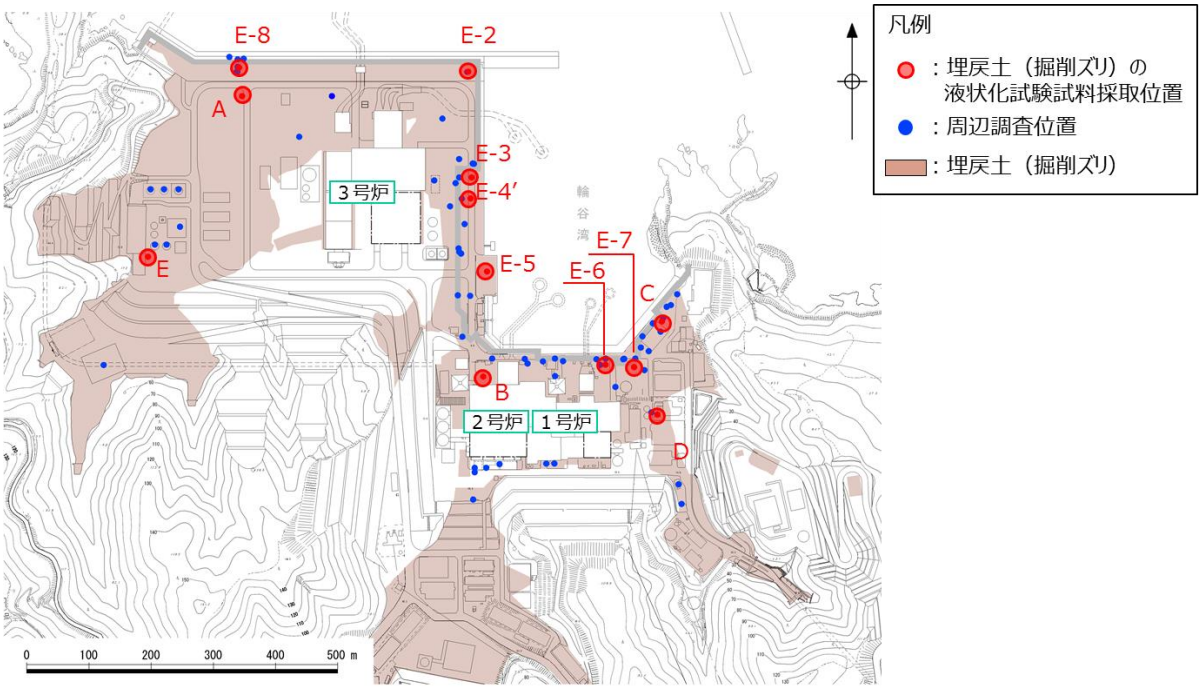
第3-1-2 表　各基準類における液状化強度比R_Lと基本物性の相関性

基準類名	液状化強度比R_Lの算定に用いる主物性	液状化強度比R_Lの補正に用いる物性
道路橋示方書・同解説 V 耐震設計編，日本道路協会，H24 （下水道施設の耐震対策指針と解説，日本下水道協会，H18） （河川砂防技術基準（案）同解説　設計編，日本河川協会編，H9） （高圧ガス設備等耐震設計指針，高圧ガス保安協会，H12）	N値 （有効上載圧を考慮した補正を行う）	細粒分含有率Fc
港湾の施設の耐震設計に係る当面の措置（その2），日本港湾協会，H19 （部分改訂，H24）		細粒分含有率Fc
建築基礎構造設計指針，日本建築学会，H13 （水道施設耐震工法指針・同解説，日本水道協会，H9）		細粒分含有率Fc
鉄道構造物等設計標準・同解説　耐震設計，（財）鉄道総合技術研究所，H24		細粒分含有率Fc 平均粒径D_{50}
港湾の施設の技術上の基準・同解説，日本港湾協会，H19 埋立地の液状化対策ハンドブック（改訂版），運輸省港湾局監修，H9		細粒分含有率Fc

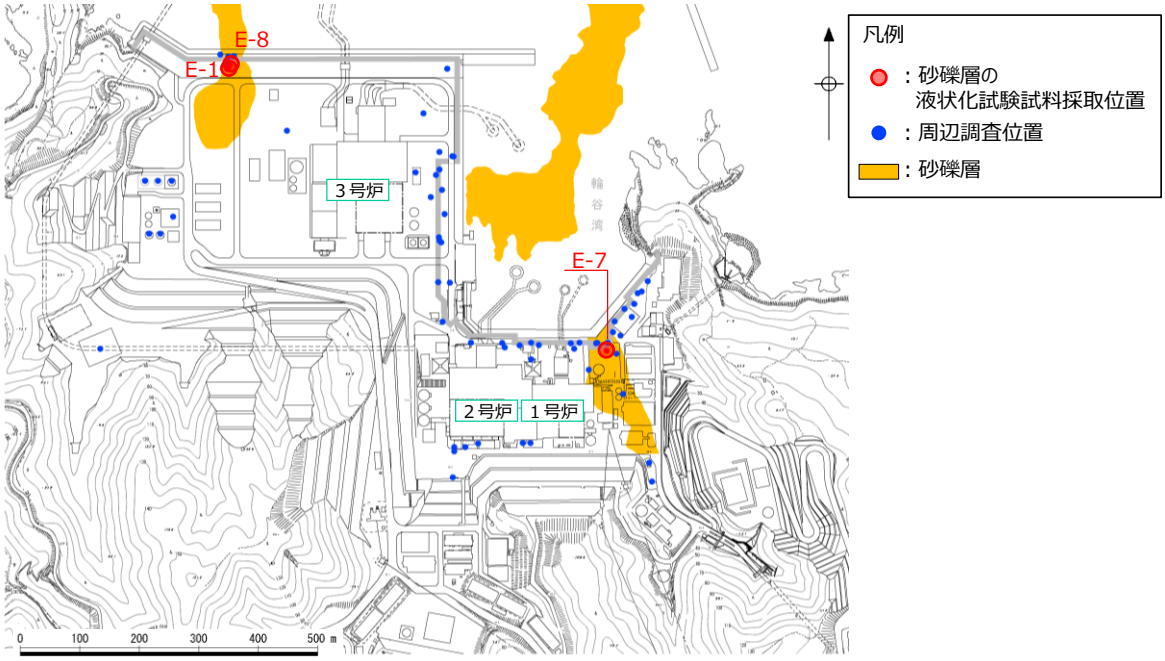
第3-1-3 表　各基準類における地盤物性値のばらつきに対する考え方

基準類名	地盤物性値のばらつきに対する考え方
地盤工学会基準 JGS4001	・設計に用いる「特性値」の決定にあたっては，過去の経験にもとづき，地盤パラメータのばらつきや単純化したモデルの適用性に十分留意しなければならない。 ・この特性値は，原則として導出値の平均値（期待値）である。この平均値は単なる機械的な平均値ではなく，統計的な平均値の推定誤差を勘案したものでなければならない。 ・特性値を示すにあたっては，地盤の特性を記述するために，特性値に加えて，導出値のばらつきの指標（たとえば標準誤差や変動係数）を含めることが望ましい。
港湾基準	・性能照査に用いる地盤定数の設計用値は，原則として地盤工学会基準JGS4001に基づき，推定する。 ・地盤定数の代表値である特性値は，データ数が十分かつ導出値のばらつきが小さい場合には，原則として導出値の平均値をもって算定することができる。ただし，データ数が不足している場合（10個未満）及び導出値のばらつきが大きい場合には，導出値の平均値を補正した上で，特性値を設定する必要がある。 ・特性値は，導出値のばらつきに関する補正係数b1を標準偏差として定義される変動係数に応じて設定することにする。
道路橋示方書	・地盤は複雑でばらつきの大きい材料であるが，設計に用いる地盤定数は，基礎に作用する荷重に対して，その条件下で最も高い確率で起こり得る基礎の挙動を推定するものである。したがって，地盤定数は，計算式の精度や特性を考慮したうえで，当該地盤の平均的な値と考えられるものを求めることが原則である。 ・自然地盤から得られる計測データは多様で，しかもばらつくのがふつうである。データのばらつきだけでなく，データ数を合理的に評価して設計に用いる地盤定数を定める必要がある。

※σ：標準偏差

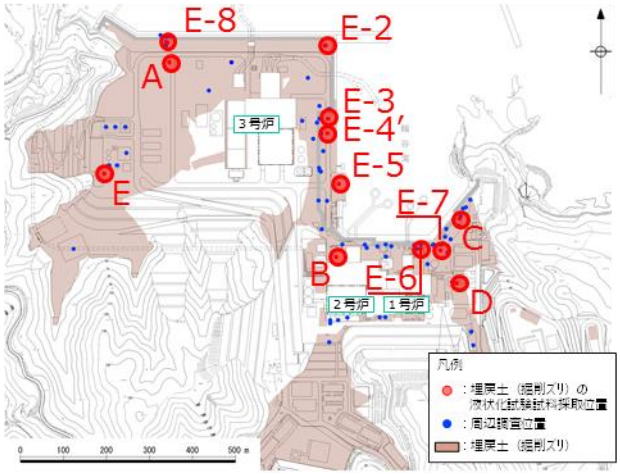


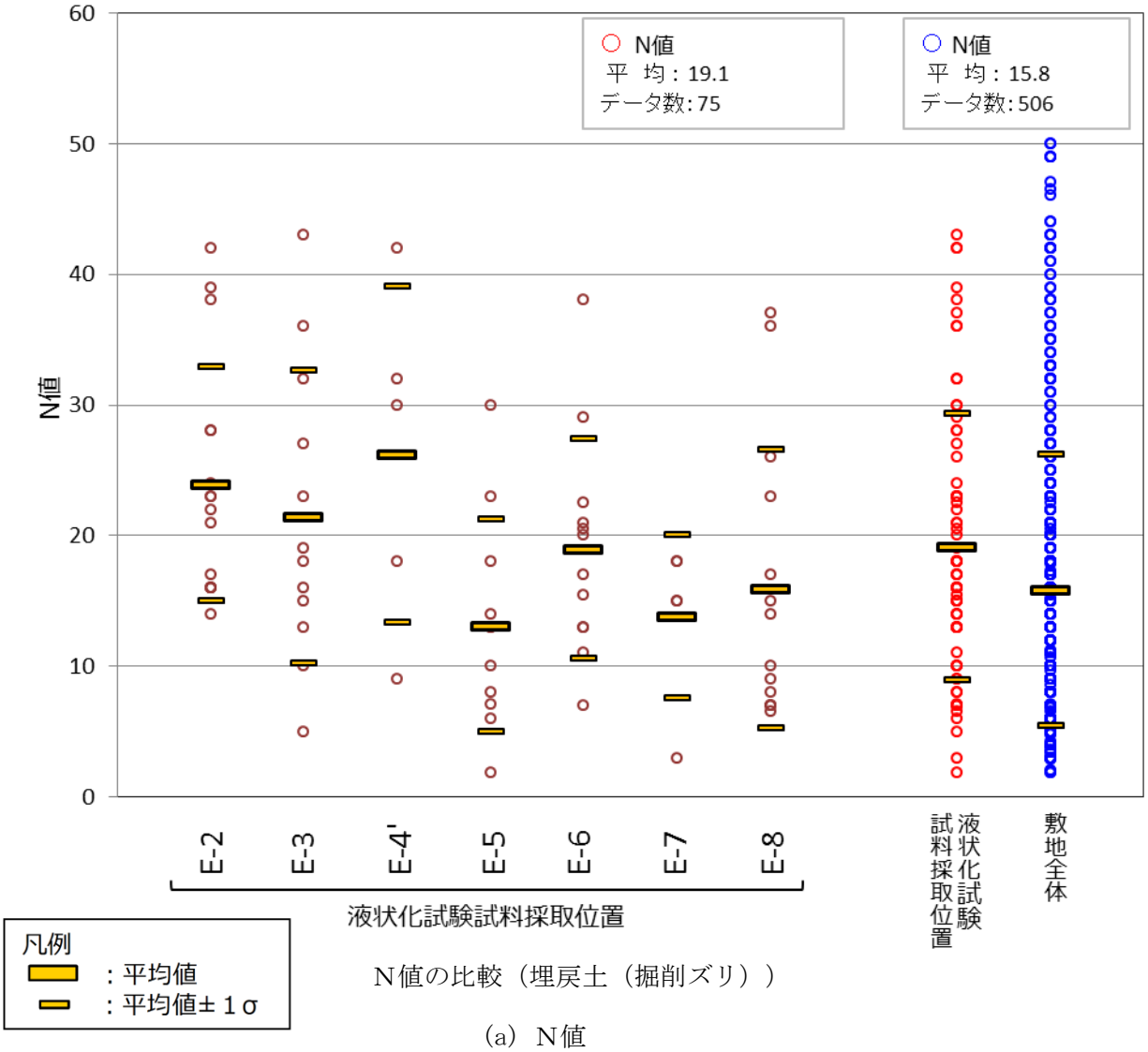
埋戻土(掘削ズリ)



砂礫層

第3-1-18 図　比較対象位置図

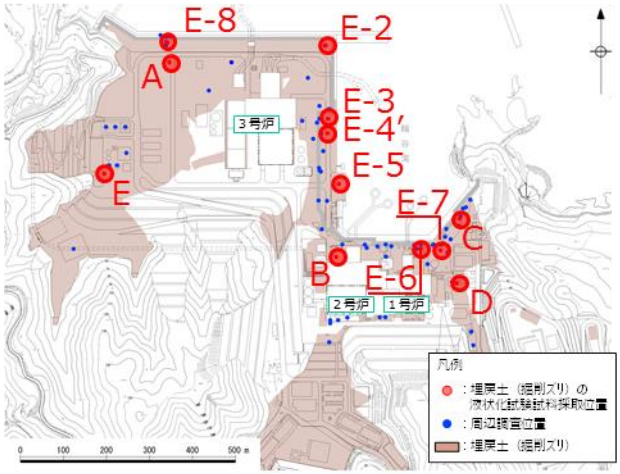


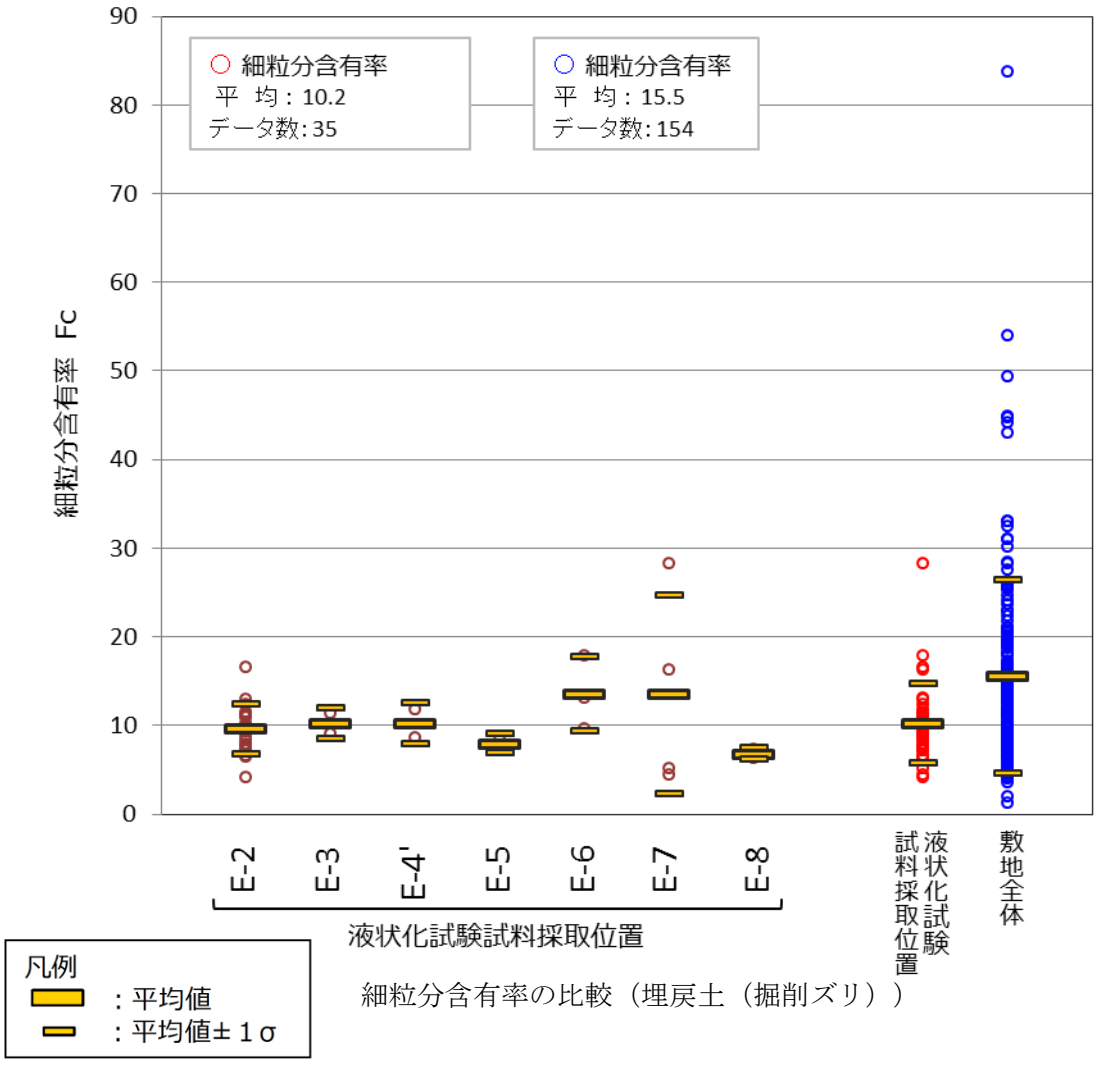


N値の比較（埋戻土（掘削ズリ））

(a) N値

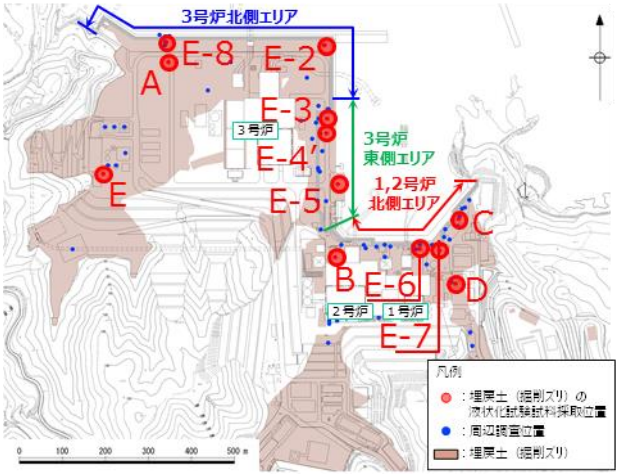
第 3-1-19 図　液状化試験試料採取位置と敷地全体の基本物性比較
（埋戻土(掘削ズリ)）

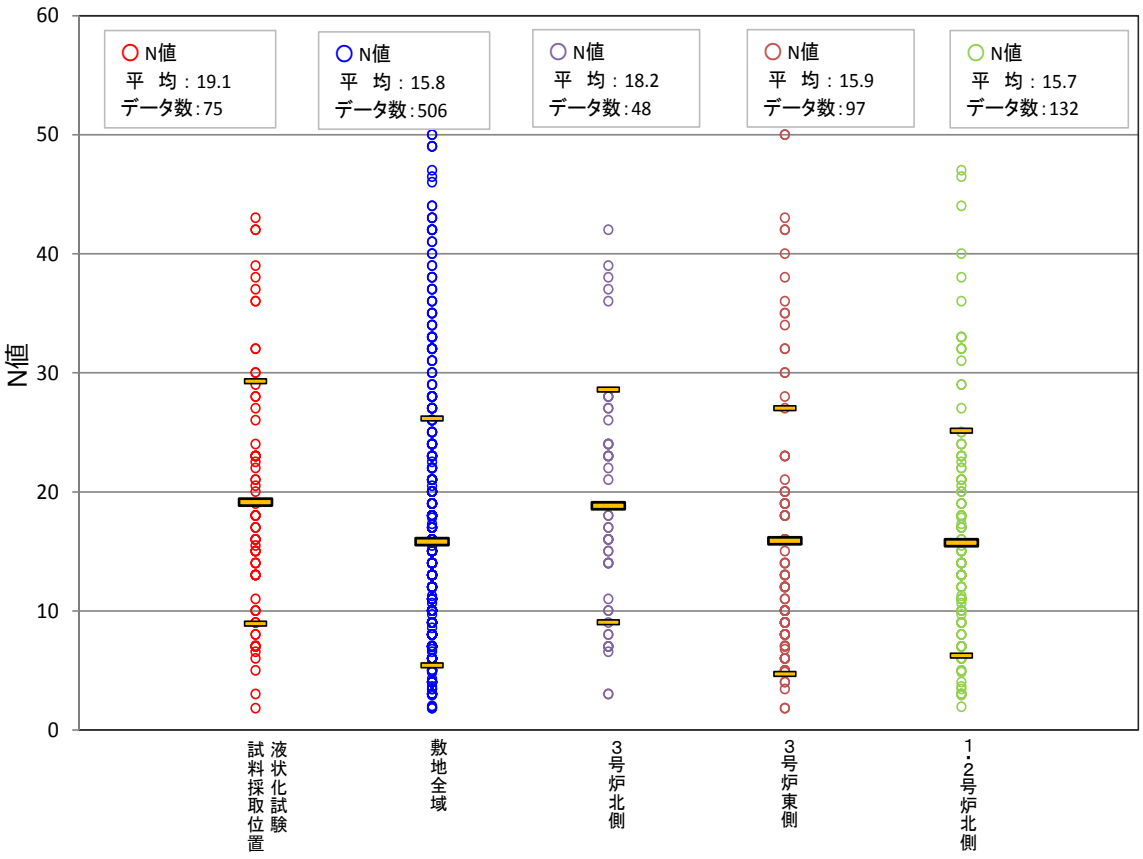




(b) 細粒分含有率

第 3-1-19 図　液状化試験試料採取位置と敷地全体の基本物性比較
（埋戻土(掘削ズリ)）



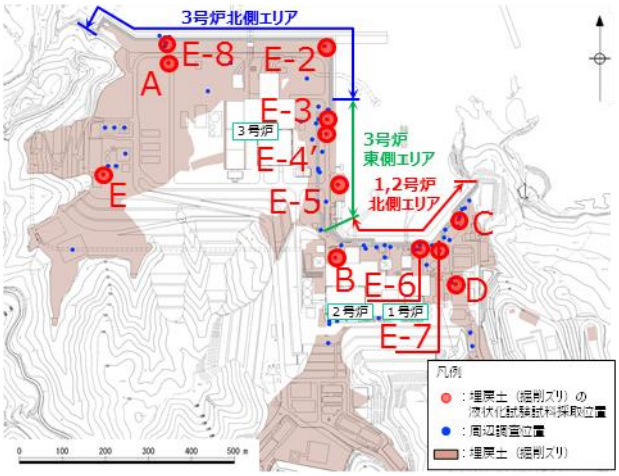


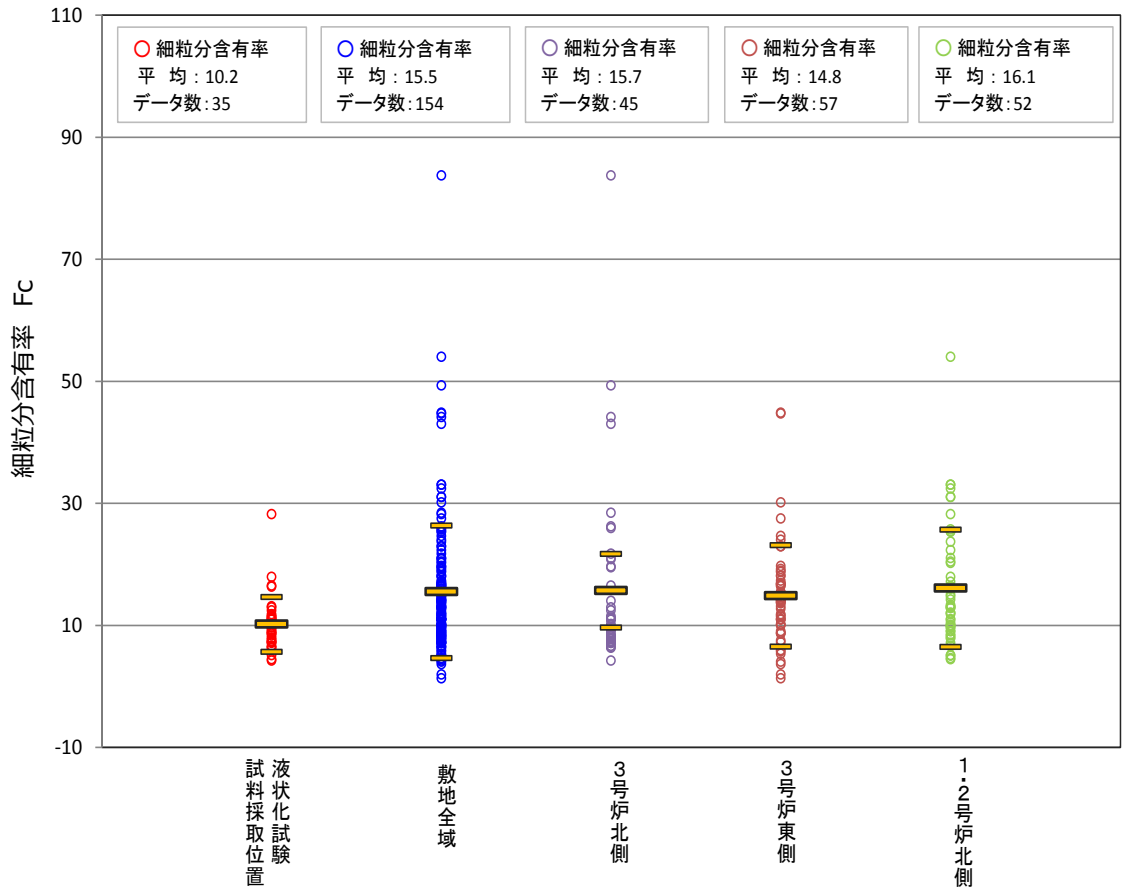
凡例
：平均値
：平均値±１σ

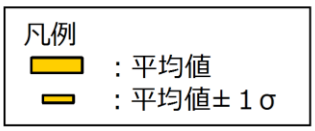
Ｎ値の比較（埋戻土（掘削ズリ））

(a) Ｎ値

第 3-1-19 図　液状化試験試料採取位置と防波壁近傍の基本物性比較
（埋戻土(掘削ズリ)）



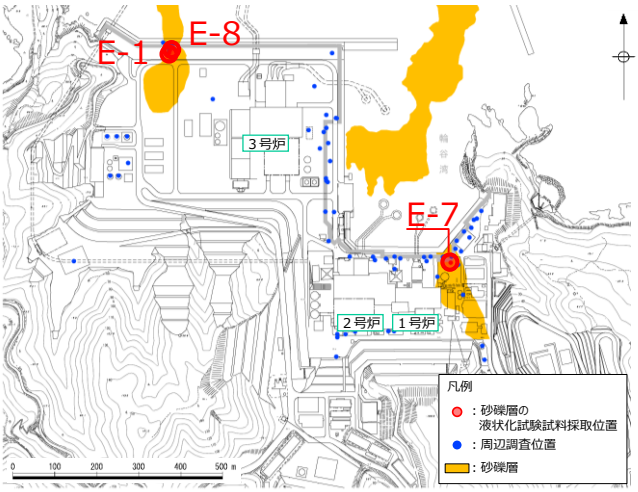


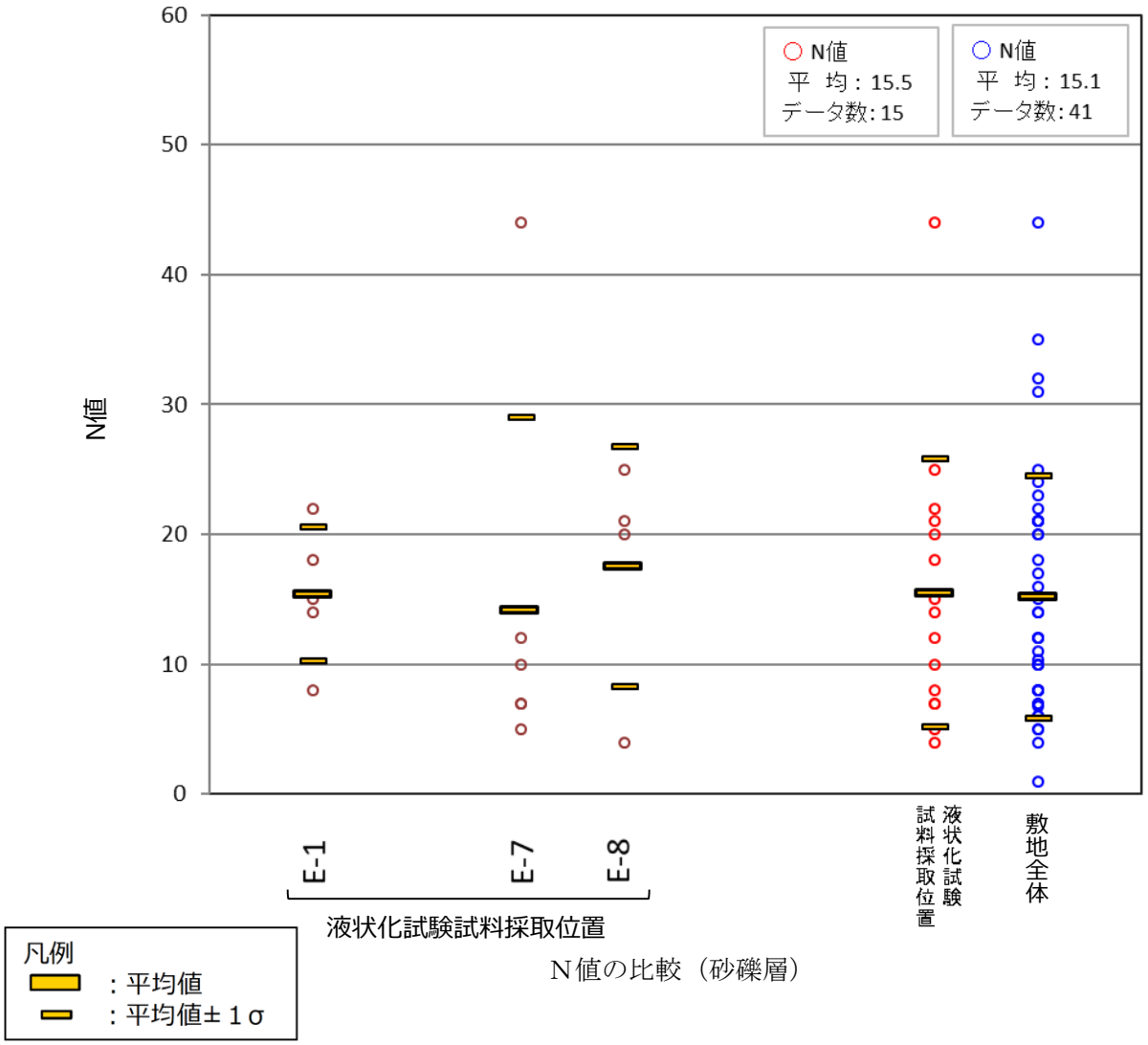


細粒分含有率の比較（埋戻土（掘削ズリ））

(b) 細粒分含有率

第 3-1-19 図　液状化試験試料採取位置と防波壁近傍の基本物性比較
（埋戻土(掘削ズリ)）

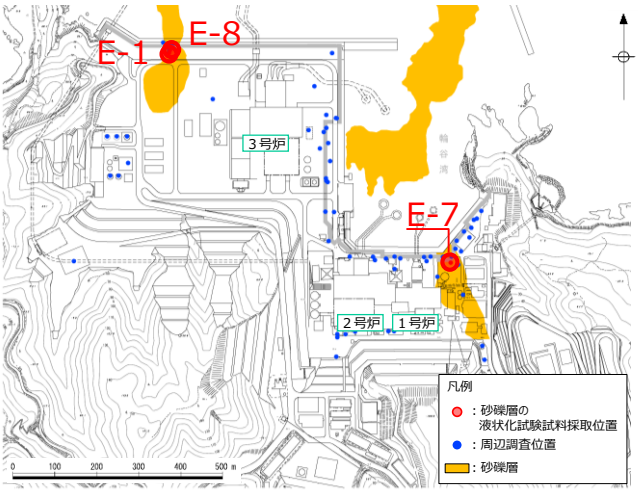


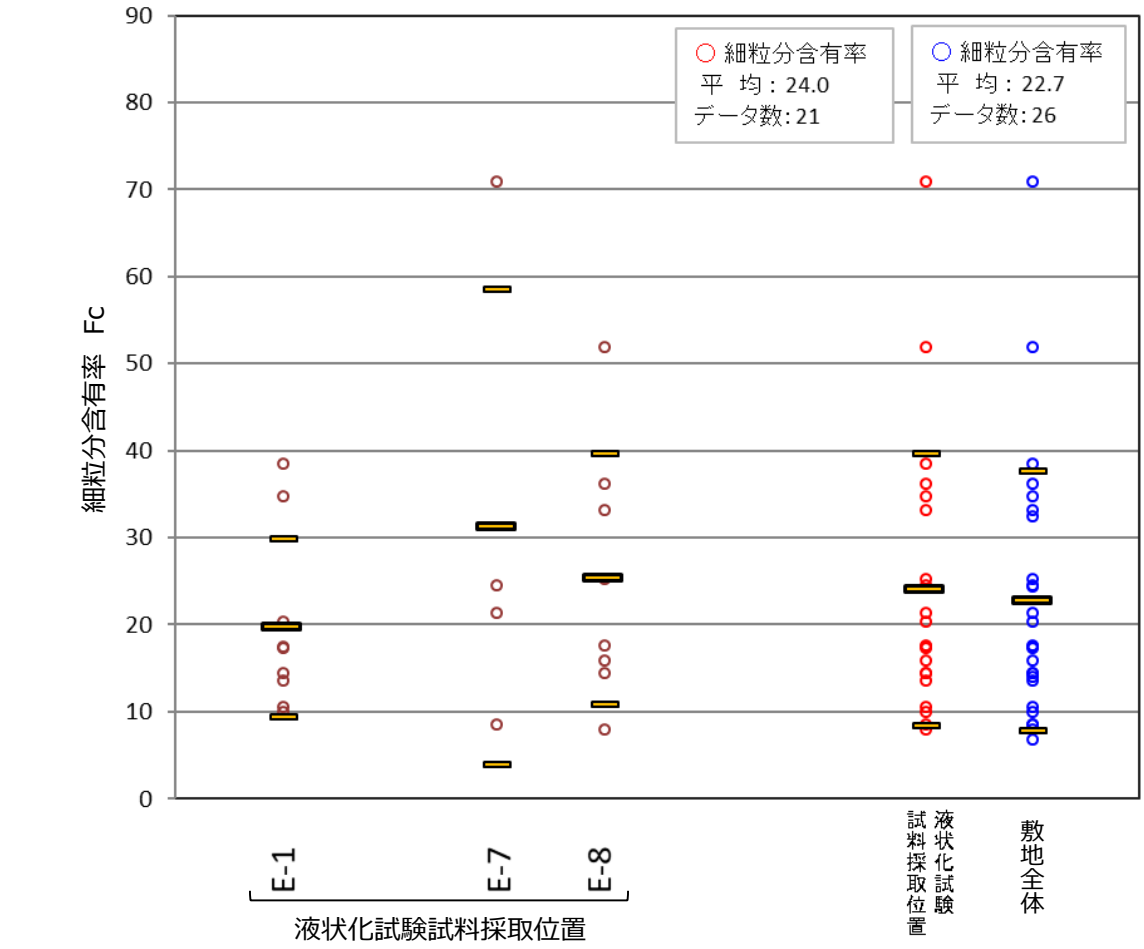


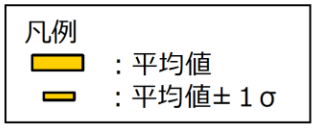
Ｎ値の比較（砂礫層）

(a) Ｎ値

第 3-1-19 図　液状化試験試料採取位置と敷地全体の基本物性比較
（砂礫層）







細粒分含有率の比較（砂礫層）

(b) 細粒分含有率

第 3-1-19 図　液状化試験試料採取位置と敷地全体の基本物性比較（砂礫層）

3.2　液状化試験結果

3.2.1　液状化試験方法

地盤工学会では，地盤の液状化強度特性を求めるための繰返し非排水三軸試験方法（JGS 0541）（地盤工学会，H21）が規定されている。実務的には，地盤の液状化強度特性を求める試験方法として，繰返し非排水三軸試験のほかに，中空円筒供試体による繰返しねじりせん断試験等が用いられる。（安田,H3）

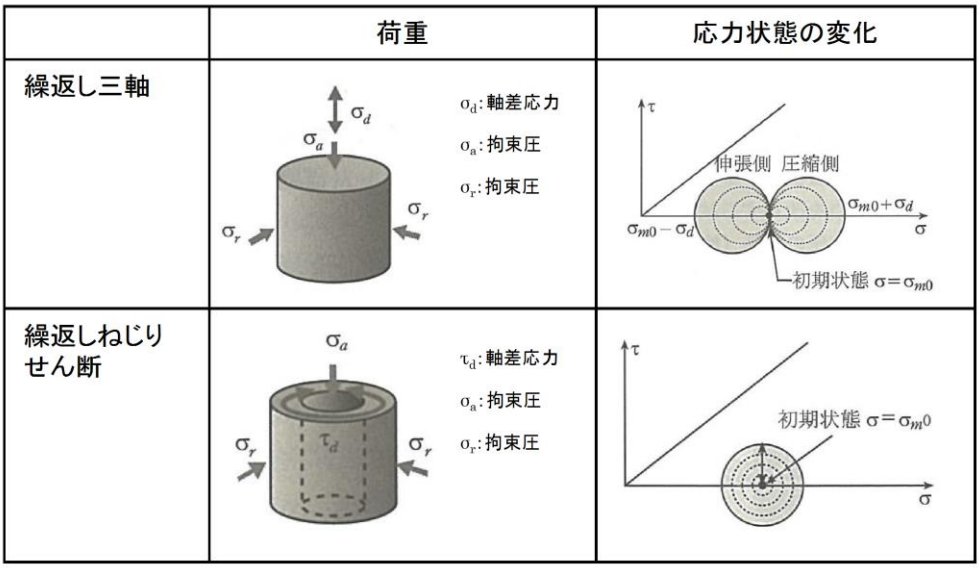
第3-2-1図に一般的な液状化試験方法の例を，第3-2-2 図に液状化試験結果の例を示す。

繰返し非排水三軸試験では，等方に拘束圧をかけた状態で軸方向に外力を繰返し与えて液状化させるので，圧縮側と引張側で応力経路やひずみの生じ方が異なる。一方，繰返しねじりせん断試験では，円周方向に回転させるように外力を加える。原地盤の拘束圧に近い異方応力状態での試験も可能である。また，応力経路も原地盤に近い挙動となる。

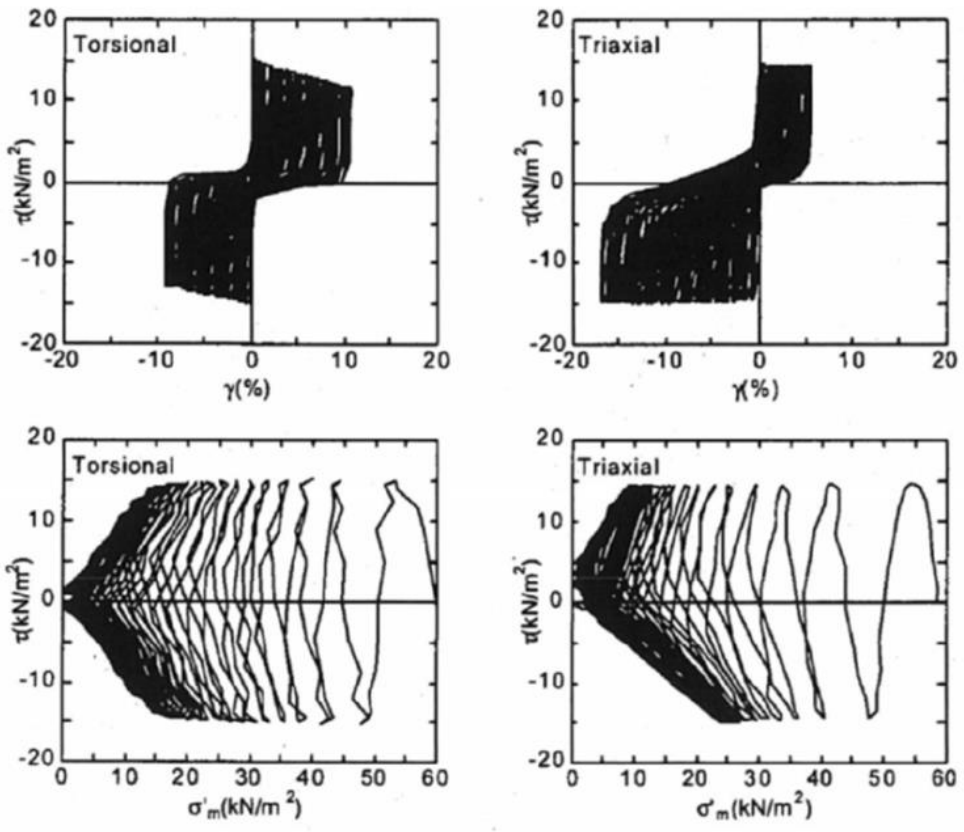
ただし，実務では装置や操作が比較的容易であり，実績の多い繰返し非排水三軸試験が用いられることが多い。また，繰返しねじりせん断試験では中空の円筒状の供試体を用いるので，粒径が大きい試料には適用が困難である。

以上を踏まえ，埋戻土（掘削ズリ）及び砂礫層を対象とした液状化試験を実施するに当たり，繰返し非排水三軸試験を採用した。

実施した繰返し非排水三軸試験の概要を第3-2-3 図に示す。



第3-2-1 図　一般的な液状化試験方法の例
（吉田，H22）



(a) 繰返しねじりせん断試験　　(b)繰返し非排水三軸試験

第3-2-2 図　液状化試験結果の例

［上図：応力-ひずみ関係，下図：応力経路］

（土木学会，H15）

試験の概要

・土の繰返し非排水三軸試験方法（JGS 0541-2009）を参考に実施。なお，供試体はロータリー式三重管サンプラー及び表層試料採取により採取した試料とした。

【試験概要】

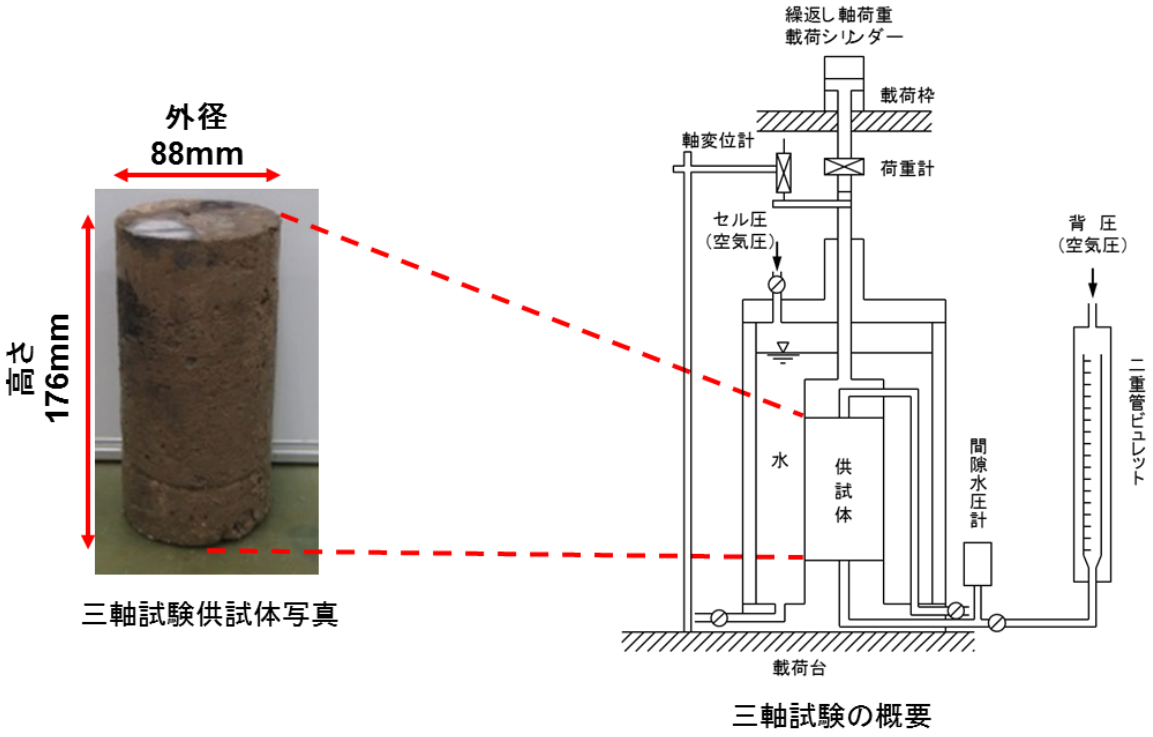
・供試体寸法　：外径88mm，高さ176mm

・載荷波形　　：正弦波（0.1Hz）

・拘束圧　　：供試体平均深度の有効土被り圧を考慮して設定

・両振幅軸ひずみ10%に達するまで試験を実施する。

・所定の両振幅軸ひずみ（１，２，５，10%）及び過剰間隙水圧比0.95の繰返し回数を評価。



第3-2-3 図　繰返し非排水三軸試験の概要

3.2.2　液状化試験結果の分類に対する基本的考え方

レベル２地震動による液状化研究小委員会活動成果報告書（土木学会，H15）では，地盤の液状化及びそれに関連する事象の定義として，以下のように記載されている。第3-2-4 図に地盤の強度とダイレイタンシー特性の概要を示す。

【液状化】

地震の繰返しせん断力などによって，飽和した砂や砂礫などの緩い非粘性土からなる地盤内での間隙水圧が上昇・蓄積し，有効応力がゼロまで低下し液体状となり，その後地盤の流動を伴う現象。

【サイクリックモビリティ】

繰返し載荷において土が「繰返し軟化」する過程で，限られたひずみ範囲ではせん断抵抗が小さくなっても，ひずみが大きく成長しようとすると，正のダイレイタンシー特性のためにせん断抵抗が急激に作用し，せん断ひずみの成長に歯止めがかかる現象。主に，密な砂や礫質土，過圧密粘土のように正のダイレイタンシー特性が著しい土において顕著に現れる。

【繰返し軟化】

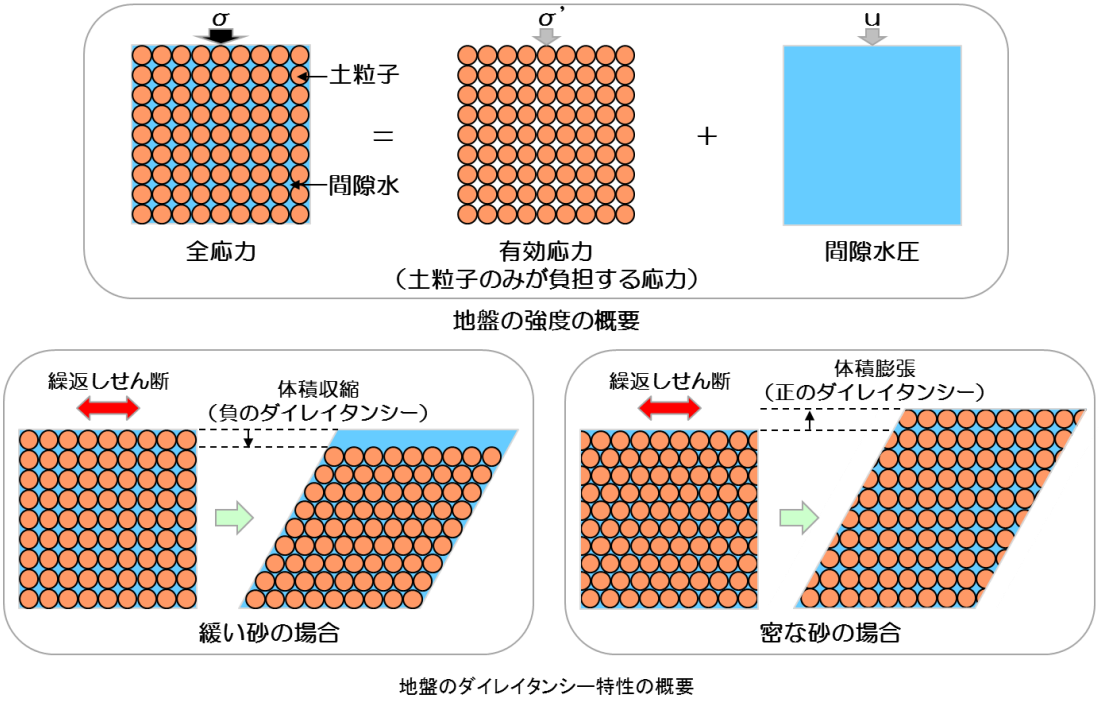
繰返し載荷による間隙水圧上昇と剛性低下によりせん断ひずみが発生し，それが繰返し回数とともに徐々に増大するが，土の持つダイレイタンシー特性や粘性のためにひずみは有限の大きさにとどまり，大きなひずみ範囲にいたるまでの流動は起きない。

これらの事象のうちサイクリックモビリティは，その現象の違いから一般的に液状化とは区別されている（第3-2-1 表参照）。以下に既往文献におけるサイクリックモビリティの記述を示す。また，第3-2-5 図及び第3-2-6 図に緩い砂と密な砂の液状化試験結果の比較を示し，液状化とサイクリックモビリティの違いを整理した。

・サイクリックモビリティとは，砂などの繰返し載荷において，有効拘束圧がゼロに近づいてから，載荷時にせん断剛性の回復，除荷時に有効応力の減少を繰り返していくが，ひずみは有限の大きさにとどまる現象であり，液状化とは区別して用いられることがある。（地盤工学会，H18）
・地盤の液状化は，緩い砂地盤が繰り返しせん断を受け，せん断振幅が急増し，地盤全体が泥水状態となり，噴砂や噴水を伴うことが多いので，現象的にサイクリックモビリティとは異なる。（井合，H20）
・サイクリックモビリティにおいて，有効応力がゼロになるのは，せん断応力がゼロになる瞬間だけであり，せん断応力が作用している間は有効応力が存在するので，間隙水圧比が100％に達した後でも，繰返しせん断に対して相当な剛性を保持する。（吉見，H3）
・密詰めの場合には大ひずみは生じない。一時的に有効拘束圧が０になっても，その後にせん断力を加えると負の過剰間隙水圧が発生して有効拘束圧が増加（回復）し，有限の小さなひずみ振幅しか発生しない。この現象を“サイクリ

ックモビリティー”と呼んで液状化と区別することもある。(安田，H3)

これらの知見を踏まえて，液状化試験結果を，「液状化」，「繰返し軟化（サイクリックモビリティ含む)」及び「非液状化」の３つに大別することとした。

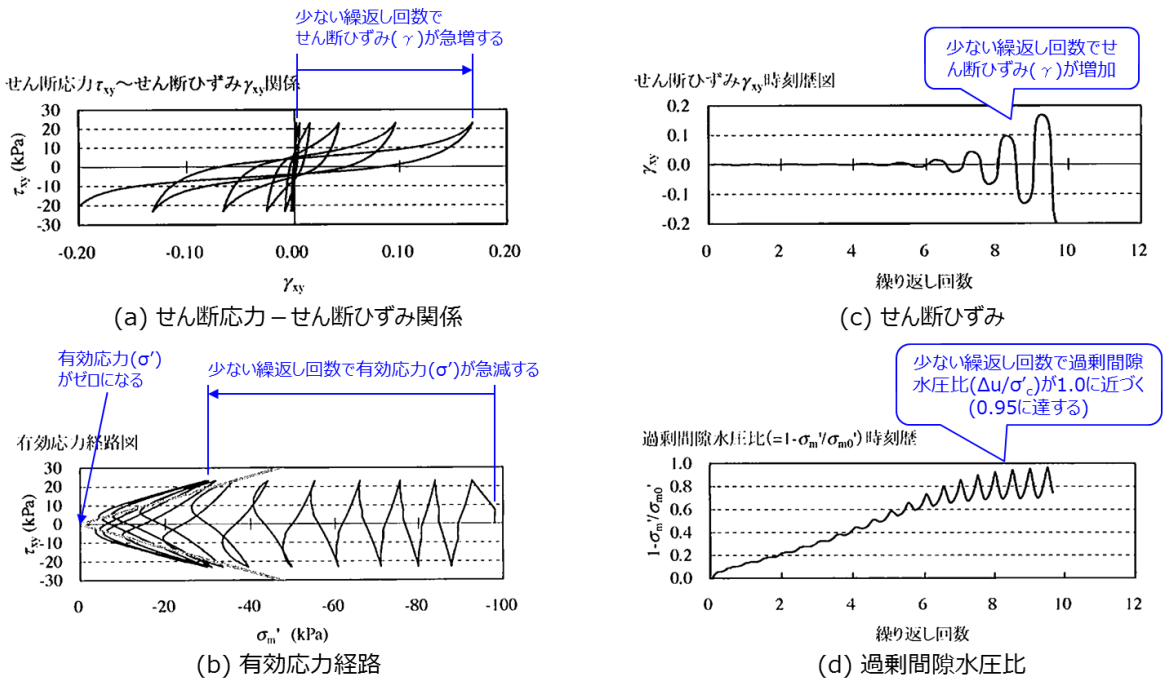


第3-2-4 図　地盤の強度とダイレイタンシー特性の概要

第3-2-1 表　液状化試験結果の分類

○:該当する　×:該当しない

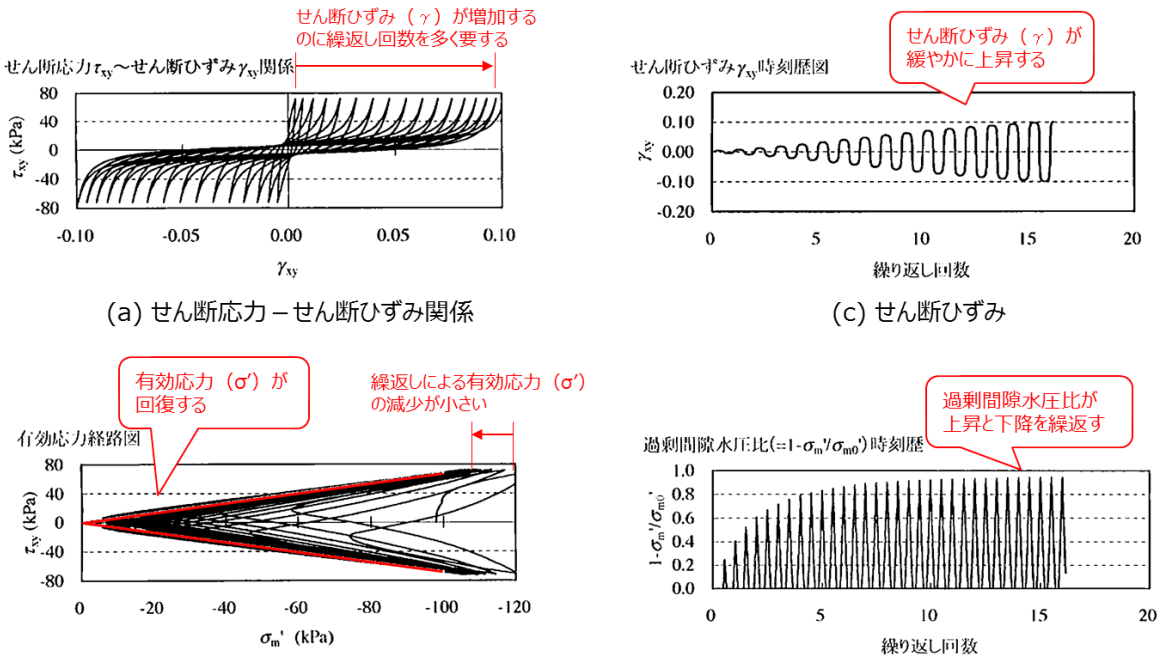
判定項目	液状化	繰返し軟化		非液状化
			サイクリック モビリティ	
・間隙水圧が上昇・蓄積する。（過剰間隙水圧比95%を超える。）	○	○	○	×
・有効応力がゼロまで低下する。	○	×	○	×
・液体状となり流動する。（ひずみが急増する。）	○	×	×	×
・正のダイレイタンシー特性によりせん断抵抗が作用する。（有効応力が回復する。）	×	○	○	○



液状化試験の例（液状化する場合）

1) 井合進：サイクリックモビリティ，地盤工学会誌，H20.10

第3-2-5 図　緩い砂の液状化試験結果



液状化試験の例（繰返し軟化（サイクリックモビリティを含む）の場合）

1)井合進，飛田哲男，小堤治：砂の繰返し載荷時の挙動モデルとしてのひずみ空間多重モデルによるストレスダイレイタンシー関係，京都大学防災研究所年報，第51号

第3-2-6 図　密な砂の液状化試験結果

3.2.3　試験結果の分類

第3-2-2～16 表に各土層の液状化試験結果を，第3-2-7～21 図に各土層の液状化試験結果の例を，第3-2-17 表に液状化試験結果のまとめを示す。

【Ｅ－２地点（埋戻土(掘削ズリ)）】

・いずれの試料においても，過剰間隙水圧比が上昇・下降を繰返し，上昇時に1.0に近づき（0.95を上回り），せん断ひずみは緩やかに上昇した。また，有効応力は減少するがせん断変形時の正のダイレイタンシー特性により回復した。

【Ｅ－３地点（埋戻土(掘削ズリ)）】

・いずれの試料においても，過剰間隙水圧比が上昇・下降を繰返し，上昇時に1.0に近づき（0.95を上回り），せん断ひずみは緩やかに上昇した。また，有効応力は減少するがせん断変形時の正のダイレイタンシー特性や粘性により回復した。

【Ｅ－４’地点（埋戻土(掘削ズリ)）】

・S4-5は過剰間隙水圧比が上昇・下降を繰返し，上昇時に1.0に近づき（0.95を上回り），せん断ひずみは緩やかに上昇した。また，有効応力は減少するがせん断変形時の正のダイレイタンシー特性や粘性により回復した。
・S4-6，S4-8-2は過剰間隙水圧比が上昇・下降を繰返すが，0.95を上回らなかった。

【Ｅ－５地点（埋戻土(掘削ズリ)）】

・過剰間隙水圧比が上昇・下降を繰返し，上昇時に1.0に近づき（0.95を上回り），せん断ひずみは緩やかに上昇した。また，有効応力は減少するがせん断変形時の正のダイレイタンシー特性や粘性により回復した。

【Ｅ－６地点（埋戻土(掘削ズリ)）】

・S6-1-2は過剰間隙水圧比が上昇・下降を繰返し，上昇時に1.0に近づき（0.95を上回り），せん断ひずみは緩やかに上昇した。また，有効応力は減少するがせん断変形時の正のダイレイタンシー特性や粘性により回復した。
・S6-1-1，S6-3は過剰間隙水圧比が上昇・下降を繰返し，上昇時に1.0に近づき（0.95を上回り），せん断ひずみは緩やかに上昇した。また，有効応力は減少するがせん断変形時の正のダイレイタンシー特性により回復した。

【Ｅ－７地点（埋戻土(掘削ズリ)）】

・過剰間隙水圧比が上昇・下降を繰返し，上昇時に1.0に近づき（0.95を上回り），せん断ひずみは緩やかに上昇した。また，有効応力は減少するがせん断変形時の正のダイレイタンシー特性や粘性により回復した。

【Ｅ－８地点（埋戻土(掘削ズリ)）】

・S8-4 ③は過剰間隙水圧比が上昇・下降を繰返し，上昇時に1.0に近づき（0.95を上回り），せん断ひずみは緩やかに上昇した。また，有効応力は減少するがせん断変形時の正のダイレイタンシー特性や粘性により回復した。
・S8-2，S8-4 ④は過剰間隙水圧比が上昇・下降を繰返し，上昇時に1.0に近づき（0.95を上回り），せん断ひずみは緩やかに上昇した。また，有効応力は減少するがせん断変形時の正のダイレイタンシー特性により回復した。

【Ａ地点（埋戻土(掘削ズリ)）】

・Ａ①は過剰間隙水圧比が上昇・下降を繰返し，上昇時に1.0に近づき（0.95を上回り），せん断ひずみは緩やかに上昇した。また，有効応力は減少するがせん断変形時の正のダイレイタンシー特性により回復した。
・Ａ②は過剰間隙水圧比が0.95を上回る前に両振幅軸ひずみＤＡが10%を上回った。

【Ｂ地点（埋戻土(掘削ズリ)）】

・Ｂ①は過剰間隙水圧比が上昇・下降を繰返し，上昇時に1.0に近づき（0.95を上回り），せん断ひずみは緩やかに上昇した。また，有効応力は減少するがせん断変形時の正のダイレイタンシー特性により回復した。
・Ｂ②は過剰間隙水圧比が上昇・下降を繰返すが，0.95を上回らなかった。

【Ｃ地点（埋戻土(掘削ズリ)）】

・Ｃ①～④は過剰間隙水圧比が上昇・下降を繰返し，上昇時に1.0に近づき（0.95を上回り），せん断ひずみは緩やかに上昇した。また，有効応力は減少するがせん断変形時の正のダイレイタンシー特性により回復した。

【Ｄ地点（埋戻土(掘削ズリ)）】

・Ｄ①は過剰間隙水圧比が上昇・下降を繰返すが，0.95を上回らなかった。

【Ｅ地点（埋戻土(掘削ズリ)）】

・Ｅ①は過剰間隙水圧比が上昇・下降を繰返し，上昇時に1.0に近づき（0.95を上回り），せん断ひずみは緩やかに上昇した。また，有効応力は減少するがせん断変形時の正のダイレイタンシー特性や粘性により回復した。

【Ｅ－１地点（砂礫層）】

・S1-23-3，S1-24及びS1-25は過剰間隙水圧比が上昇・下降を繰返し，上昇時に1.0に近づき（0.95を上回り），せん断ひずみは緩やかに上昇した。また，有効応力は減少するがせん断変形時の正のダイレイタンシー特性や粘性により回復した。

・S1-26は過剰間隙水圧比が上昇・下降を繰返し，上昇時に1.0に近づき（0.95を上回り），せん断ひずみは緩やかに上昇した。また，有効応力は減少するがせん断変形時の正のダイレイタンシー特性により回復した。

【Ｅ－７地点（砂礫層）】

・S7-15及びS7-17は過剰間隙水圧比が上昇・下降を繰返し，上昇時に1.0に近づき（0.95を上回り），せん断ひずみは緩やかに上昇した。また，有効応力は減少するがせん断変形時の正のダイレイタンシー特性や粘性により回復した。

・S7-16は過剰間隙水圧比が上昇・下降を繰返し，上昇時に1.0に近づき（0.95を上回り），せん断ひずみは緩やかに上昇した。また，有効応力は減少するがせん断変形時の正のダイレイタンシー特性により回復した。

【Ｅ－８地点（砂礫層）】

・S8-23-1及びS8-25は過剰間隙水圧比が上昇・下降を繰返し，上昇時に1.0に近づき（0.95を上回り），せん断ひずみは緩やかに上昇した。また，有効応力は減少するがせん断変形時の正のダイレイタンシー特性や粘性により回復した。

・S8-24は過剰間隙水圧比が上昇・下降を繰返し，上昇時に1.0に近づき（0.95を上回り），せん断ひずみは緩やかに上昇した。また，有効応力は減少するがせん断変形時の正のダイレイタンシー特性により回復した。

埋戻土（掘削ズリ）の液状化試験は，土の繰返し非排水三軸試験方法（JGS 0541）に準拠し実施した。

試験結果は過剰間隙水圧比が上昇・下降を繰返し，上昇時に1.0に近づき（0.95を上回り），せん断ひずみは緩やかに上昇する。また，有効応力は保持している，若しくは減少するがせん断変形時の正のダイレイタンシー特性により回復した。一方，Ｅ－４’地点及びＤ地点では過剰間隙水圧比が0.95を上回らなかった。これらの状況から，埋戻土（掘削ズリ）は非液状化，若しくは繰返し軟化（サイクリックモビリティ含む）であると判断した。

供試体直径の１／５を超える礫を含む供試体については，土の三軸試験の供試体作製・設置方法（JGS 0520）を満足しないため，試験結果を参考値とし，以降の評価には採用しない。埋戻土（掘削ズリ）の液状化試験結果のうち，供試体直径の１／５を超える礫を含む供試体について，液状化試験後の写真を第3-2-18 表に示す。

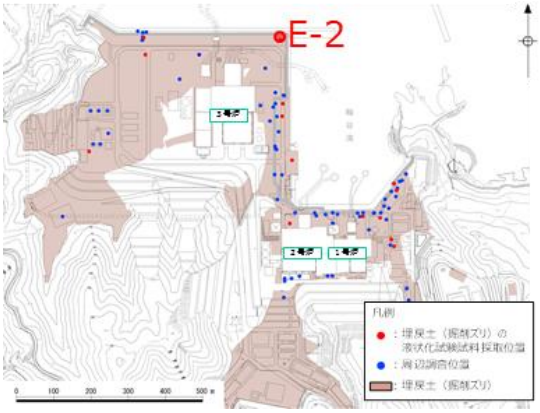
砂礫層の液状化試験は，土の繰返し非排水三軸試験方法（JGS 0541）に準拠し実施した。試験結果は過剰間隙水圧比が上昇・下降を繰返し，上昇時に1.0に近づき（0.95を上回り），せん断ひずみは緩やかに上昇する。また，有効応力は保持している，若しくは減少するがせん断変形時の正のダイレイタンシー特性により回復した。これらの状況から，砂礫層は繰返し軟化（サイクリックモビリティ含む）であると判断した。

これらの区分を整理して，第3-2-19 表に示す。

すべての土層で，液状化試験結果は繰返し軟化（サイクリックモビリティ含む）あるいは非液状化を示している。このことは，50％粒径が10㎜超過，又は，10％粒径が１㎜超過である，粗粒で均等係数が低い礫質土では透水係数が高く液状化しにくいという道路橋示方書の記載に整合する。

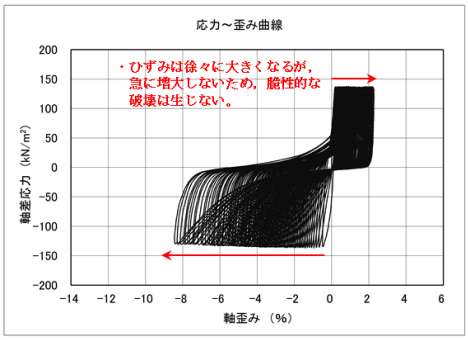
埋戻土（掘削ズリ）及び砂礫層は液状化を示さず，道路橋示方書の液状化判定法（ＦＬ法）が適用できないと考えられることから，埋戻土（掘削ズリ）について，液状化試験が基準地震動Ｓｓ相当の地盤の状態を模擬していることを確認する。

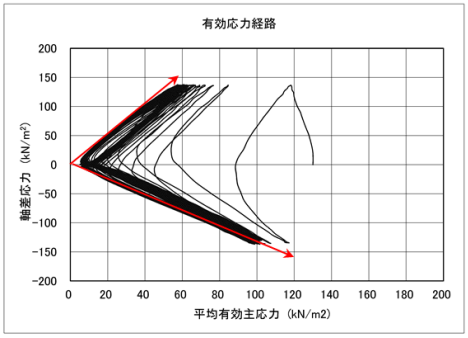
第3-2-2 表　液状化試験結果（Ｅ－２地点の埋戻土（掘削ズリ））



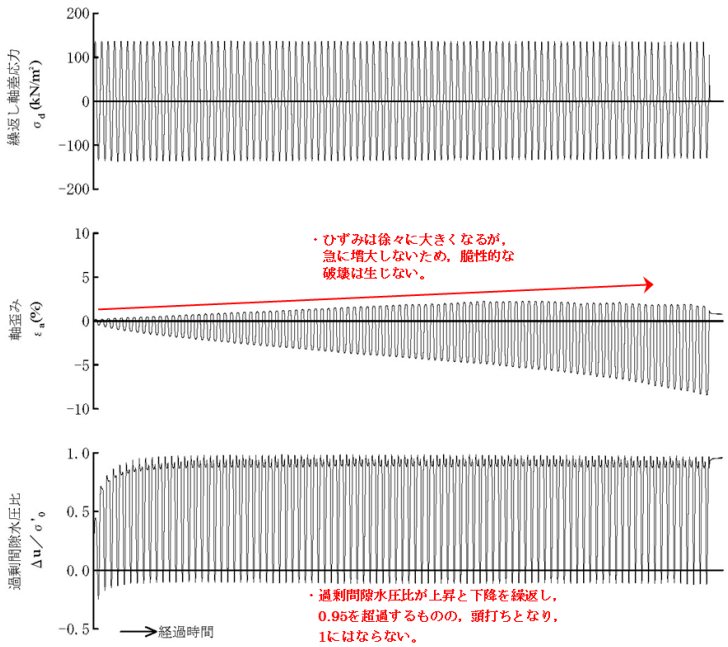
試料番号			S2-9	S2-10	S2-14-1
深度（m）			9.20～10.20	10.20～11.20	14.12～15.12
土質材料			埋戻土（掘削ズリ）		
供試体 No.			1	1	1
土粒子の密度 ρ_s(g/cm^3)			2.714	2.716	2.723
圧密応力 σ'_c(kN/m^2)			130	130	130
繰返し応力振幅比 $\sigma_d/2\sigma'_0$			0.463	0.522	0.551
繰返回数	軸ひずみ両振幅	DA = 1%	1.5	2.5	0.6
		DA = 2%	2.5	9.5	1.5
		DA = 5%	6.0	37.6	5.0
		DA = 10%	－	92.9	7.0
	過剰間隙水圧比 95% N_{u95}		3.0	7.0	3.0

：最大間隙水圧比が 1.0 に近づく（0.95 を超えるもの）
：DA=5%の値を繰り返し回数 N とする
下線：下図に例示する試験結果



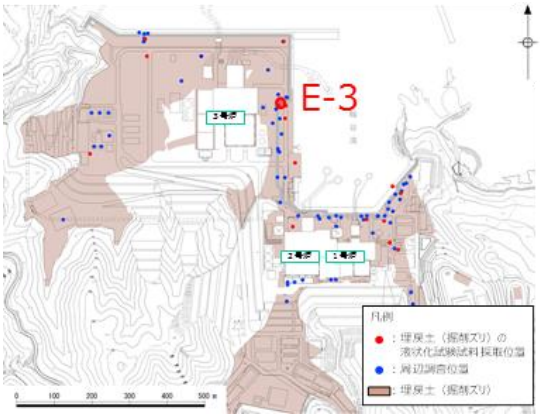


・有効応力がほぼゼロまで低下するが，ダイレイタンシー特性により有効応力が回復する。



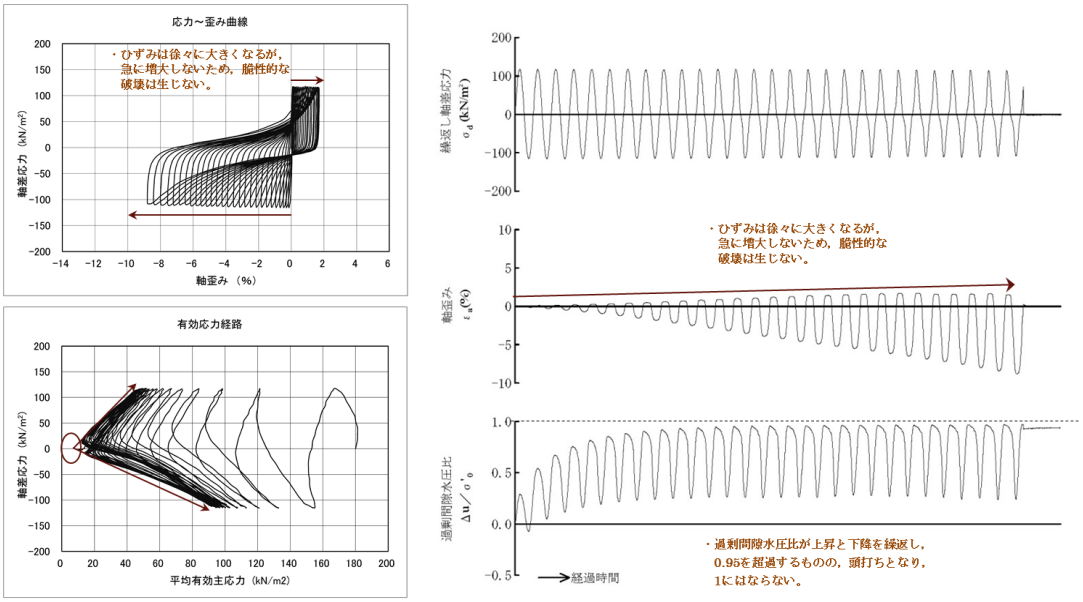
第3-2-7 図　液状化試験結果の例（Ｅ－２地点の埋戻土（掘削ズリ））

第3-2-3 表　液状化試験結果（Ｅ－３　地点の埋戻土（掘削ズリ））



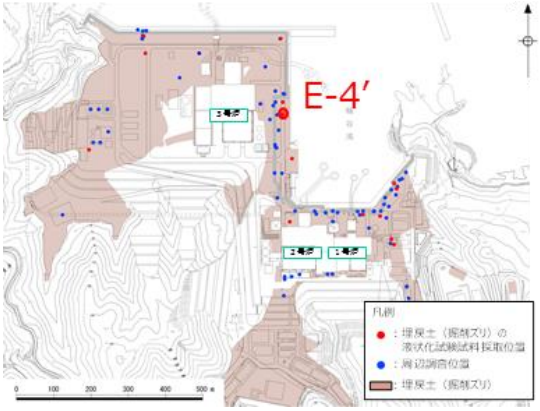
試料番号			S3-9-1	S3-9-2	S3-11
深度（m）			9.10～9.75	9.85～10.65	11.80～12.70
土質材料			埋戻土（掘削ズリ）		
供試体 No.			1	1	1
土粒子の密度 ρ_s(g/cm^3)			2.641	2.619	2.685
圧密応力 σ'_c(kN/m^2)			180	180	180
繰返し応力振幅比 $\sigma_d/2\sigma'_0$			0.258	0.323	0.357
繰返回数	両振幅軸ひずみ	DA = 1%	20.9	4.5	3.5
		DA = 2%	28.9	7.5	5.5
		DA = 5%	49.8	14.1	10.0
		DA = 10%	97.9	26.9	－
	過剰間隙水圧比 95% N_{u95}		40.0	12.0	9.0

：最大間隙水圧比が 1.0 に近づく(0.95 を超えるもの)
：DA=5%の値を繰り返し回数 N とする
下線：下図に例示する試験結果



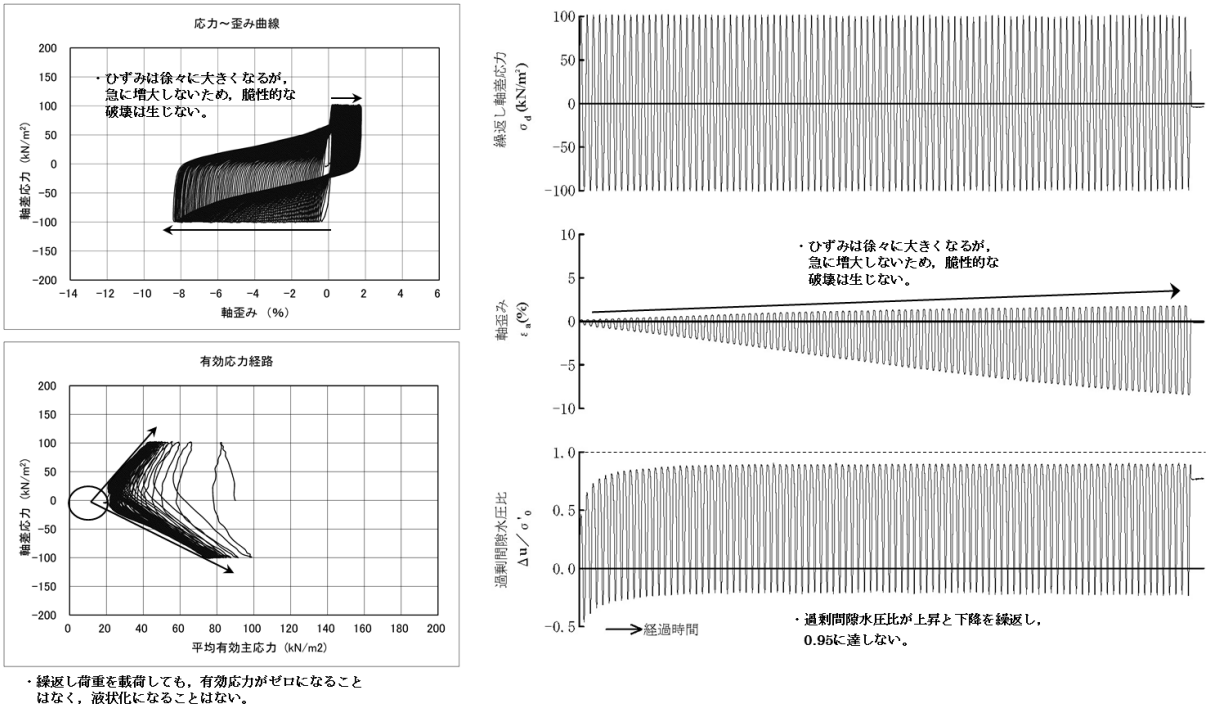
第3-2-8 図　液状化試験結果の例（Ｅ－３　地点の埋戻土（掘削ズリ））

第3-2-4 表　液状化試験結果（Ｅ－４’地点の埋戻土（掘削ズリ））



試料番号			S4-5		S4-6	S4-8-2
深度（m）			5.50～6.50		6.50～7.50	8.90～9.90
土質材料			埋戻土（掘削ズリ）			
供試体 No.			1	2	1	1
土粒子の密度 ρ_s(g/cm^3)			2.746		2.733	2.648
圧密応力 σ'_c(kN/m^2)			90		90	90
繰返し応力振幅比 $\sigma_d/2\sigma'_0$			0.336	0.435	0.560	0.636
繰返回数	両振幅軸ひずみ	DA = 1%	9.5	10.6	4.0	0.5
		DA = 2%	14.9	21.2	13.6	0.9
		DA = 5%	27.7	45.9	38.7	2.5
		DA = 10%	49.8	90.4	94.7	5.5
	過剰間隙水圧比 95% N_{u95}		20.0	52.0	—	—

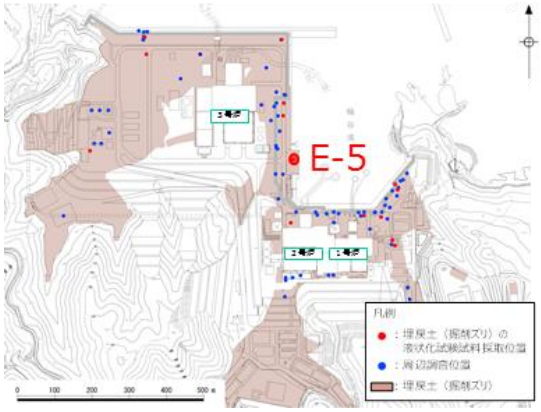
：最大間隙水圧比が 1.0 に近づく(0.95 を超えるもの)
：DA=5%の値を繰り返し回数 N とする
下線：下図に例示する試験結果



・繰返し荷重を載荷しても，有効応力がゼロになることはなく，液状化になることはない。

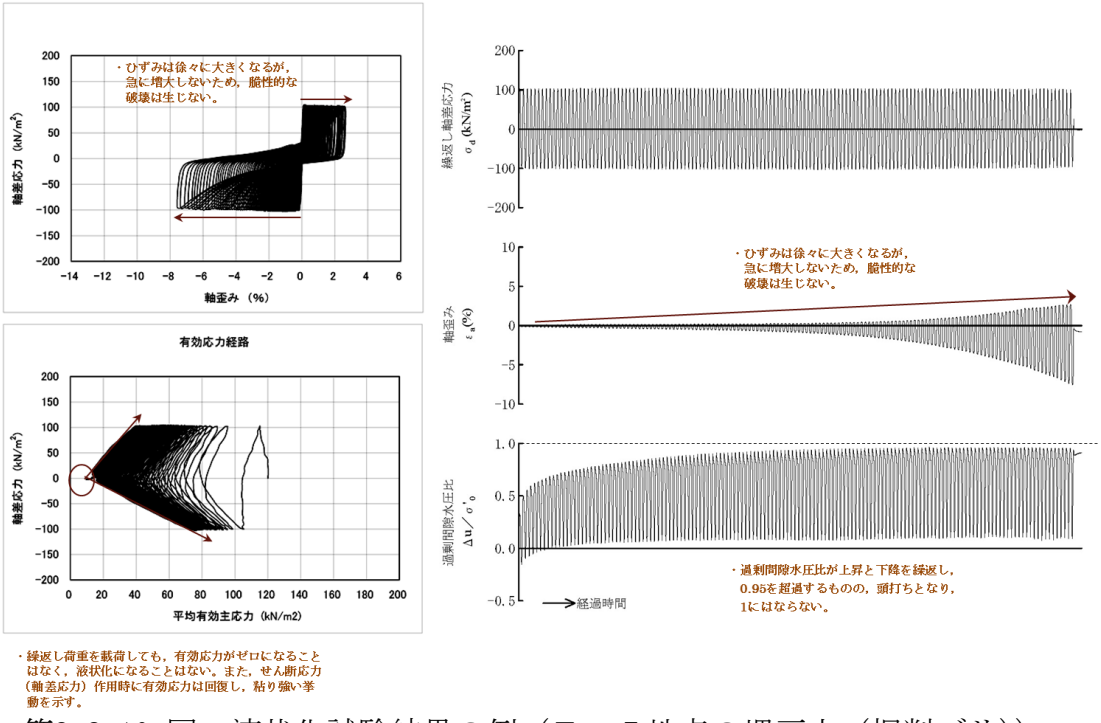
第3-2-9 図　液状化試験結果の例（Ｅ－４’地点の埋戻土（掘削ズリ））

第3-2-5 表　液状化試験結果（Ｅ－５地点の埋戻土（掘削ズリ））



試料番号			S5-1	S5-3
深度（m）			1.50～2.35	3.35～3.98
土質材料			埋戻土（掘削ズリ）	
供試体　No.			1	1
土粒子の密度 ρ_s(g/cm^3)			2.687	2.705
圧密応力 σ'_c(kN/m^2)			120	120
繰返し応力振幅比　$\sigma_d/2\sigma'_0$			0.426	0.647
繰返回数	軸ひずみ両振幅	DA = 1%	66.9	15.8
		DA = 2%	94.6	29.2
		DA = 5%	121.6	62.2
		DA = 10%	145.0	115.0
	過剰間隙水圧比　95% N_{u95}		91.0	41.0

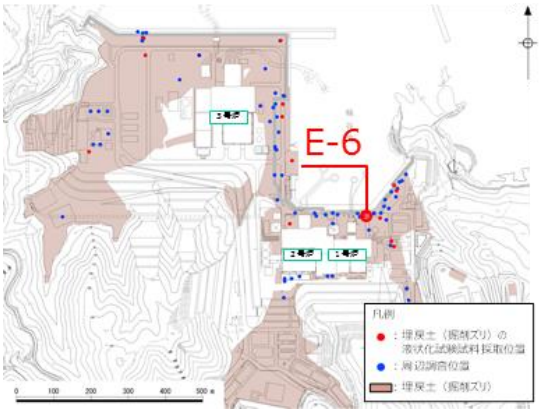
：最大間隙水圧比が 1.0 に近づく（0.95 を超えるもの）
：DA=5%の値を繰り返し回数 N とする
下線：下図に例示する試験結果



・繰返し荷重を載荷しても，有効応力がゼロになることはなく，液状化になることはない。また，せん断応力（軸差応力）作用時に有効応力は回復し，粘り強い挙動を示す。

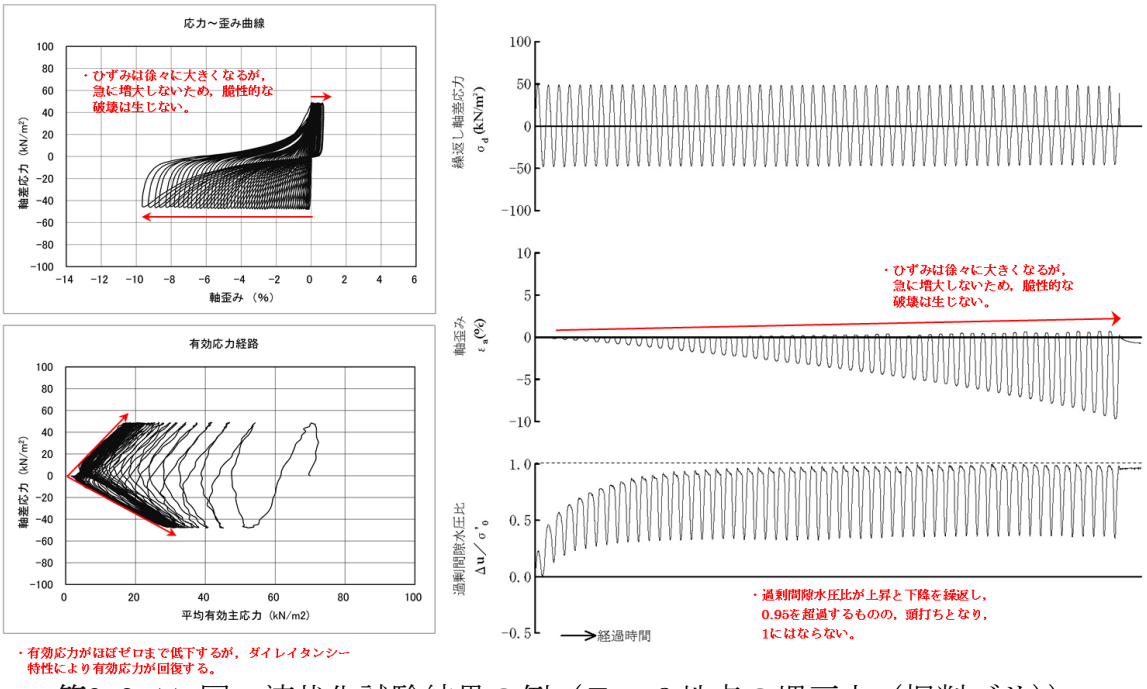
第3-2-10 図　液状化試験結果の例（Ｅ－５地点の埋戻土（掘削ズリ））

第3-2-6 表　液状化試験結果（Ｅ－６地点の埋戻土（掘削ズリ））



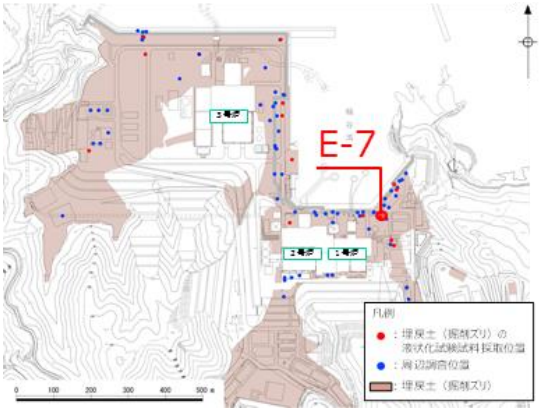
試料番号			S6-1-1	S6-1-2	S6-3
深度（m）			1.50～1.86	1.86～2.86	3.00～4.00
土質材料			埋戻土（掘削ズリ）		
供試体 No.			1	1	1
土粒子の密度 ρ_s(g/cm^3)			2.663	2.685	2.695
圧密応力 σ'_c(kN/m^2)			70	70	70
繰返し応力振幅比 $\sigma_d/2\sigma'_0$			0.276	0.461	0.345
繰返回数	軸ひずみ両振幅	DA = 1%	30.6	8.0	10.0
		DA = 2%	41.9	17.8	16.9
		DA = 5%	69.9	34.7	35.6
		DA = 10%	118.7	47.9	54.0
	過剰間隙水圧比 95% N_{u95}		43.0	30.0	17.0

：最大間隙水圧比が 1.0 に近づく(0.95 を超えるもの)
：DA=5%の値を繰り返し回数 N とする
下線：下図に例示する試験結果



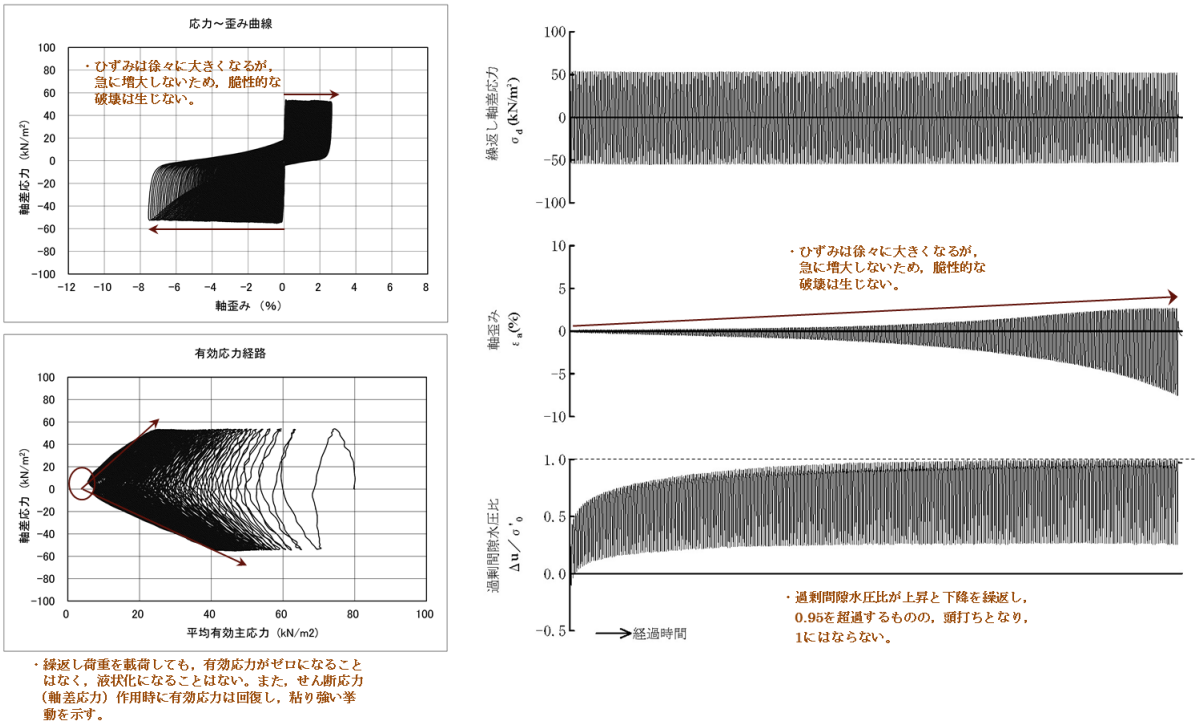
第3-2-11 図　液状化試験結果の例（Ｅ－６地点の埋戻土（掘削ズリ））

第3-2-7 表　液状化試験結果（Ｅ－７地点の埋戻土（掘削ズリ））



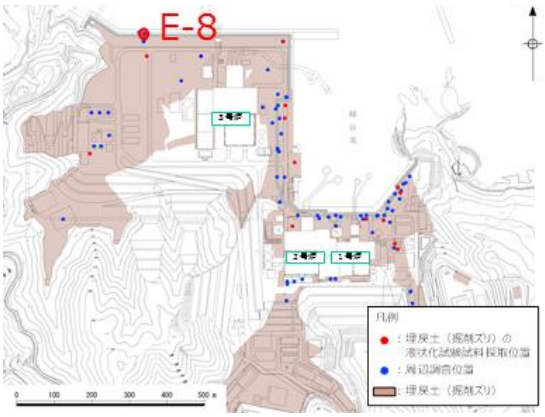
試料番号			S7-3		
深度（m）			3.40～4.40	3.40～4.40	3.40～4.40
土質材料			埋戻土（掘削ズリ）		
供試体 No.			1	3	4
土粒子の密度 ρ_s(g/cm^3)			2.701		
圧密応力 σ'_c(kN/m^2)			80		
繰返し応力振幅比 $\sigma_d/2\sigma'_0$			0.336	0.457	0.366
繰返回数	両振幅軸ひずみ	DA = 1%	96.6	0.8	9.0
		DA = 2%	167.7	2.5	21.3
		DA = 5%	252.8	10.9	52.9
		DA = 10%	324.6	24.8	99.3
	過剰間隙水圧比 95% N_{u95}		127.0	14.0	38.0

：最大間隙水圧比が 1.0 に近づく(0.95 を超えるもの)
：DA=5%の値を繰り返し回数 N とする
下線：下図に例示する試験結果



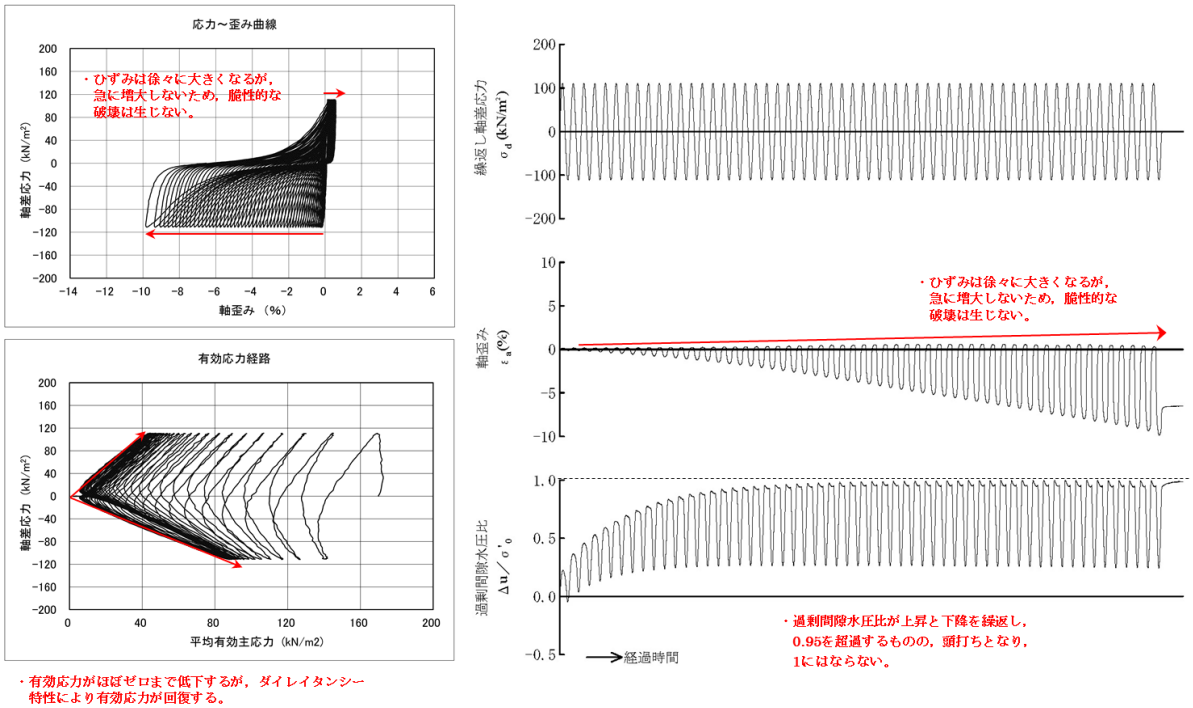
第3-2-12 図　液状化試験結果の例（Ｅ－７地点の埋戻土（掘削ズリ））

第3-2-8 表　液状化試験結果（Ｅ－８地点の埋戻土（掘削ズリ））



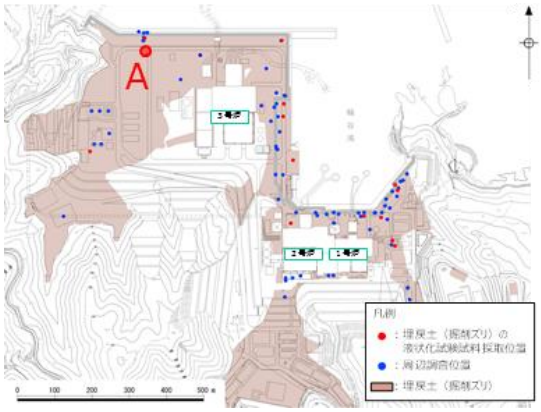
試料番号			S8-2	S8-4	
深度（m）			2.50～3.50	4.50～5.00	
土質材料			埋戻土（掘削ズリ）		
供試体 No.			2	3	4
土粒子の密度 ρ_s(g/cm^3)			2.672	2.670	
圧密応力 σ'_c(kN/m^2)			170	170	
繰返し応力振幅比 $\sigma_d/2\sigma'_0$			0.327	0.351	0.403
繰返回数	軸ひずみ両振幅	DA = 1%	9.5	5.5	2.0
		DA = 2%	16.8	10.9	5.5
		DA = 5%	31.6	23.6	22.8
		DA = 10%	55.8	34.8	66.8
	過剰間隙水圧比 95% N_{u95}		19.0	6.0	3.0

：最大間隙水圧比が 1.0 に近づく(0.95 を超えるもの)
：DA=5%の値を繰り返し回数 N とする
下線：下図に例示する試験結果



第3-2-13 図　液状化試験結果の例（Ｅ－８地点の埋戻土（掘削ズリ））

第 3-2-9 表　液状化試験結果（A地点の埋戻土（掘削ズリ））

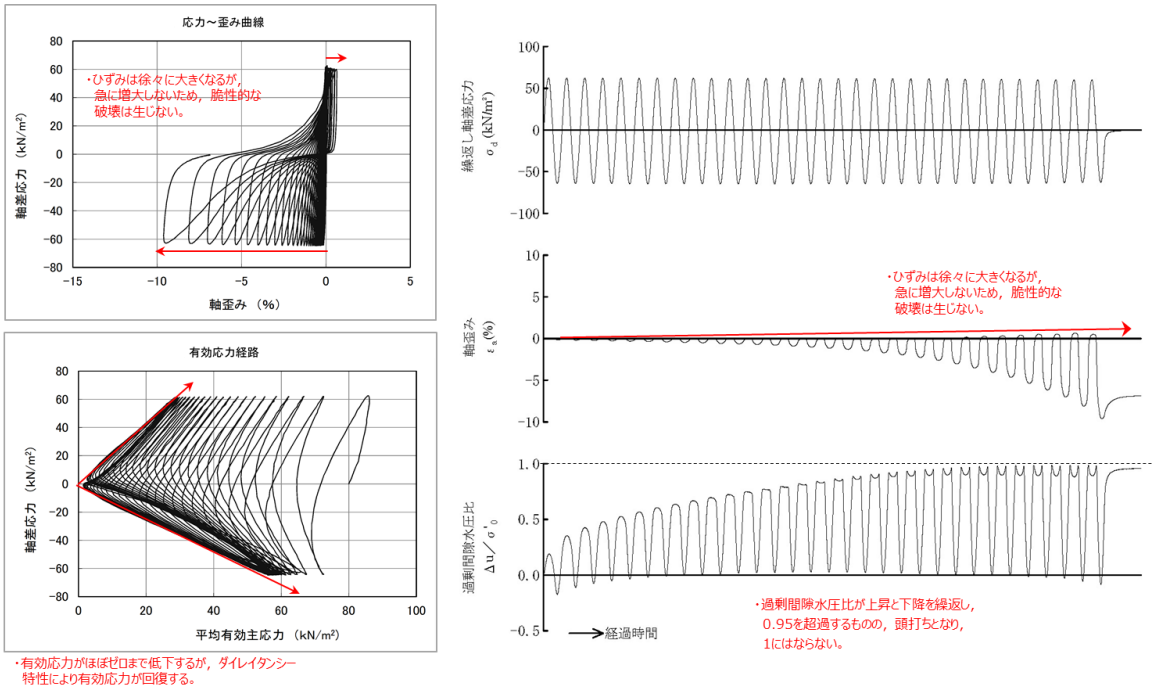


試料番号			A	
深度（m）			0.30～0.70	0.30～0.70
土質材料			埋戻土（掘削ズリ）	
供試体 No.			1	2
土粒子の密度 ρ_s(g/cm^3)			2.647	2.647
圧密応力 σ'_c(kN/m^2)			80	80
繰返し応力振幅比 $\sigma_d/2\sigma'_0$			0.395	0.498
繰返回数	両振幅軸ひずみ	DA = 1%	14.9	7.0
		DA = 2%	20.5	10.0
		DA = 5%	26.2	13.0
		DA = 10%	31.0	16.0
	過剰間隙水圧比 95% N_{u95}		22.0	－

：最大間隙水圧比が 1.0 に近づく(0.95 を超えるもの)

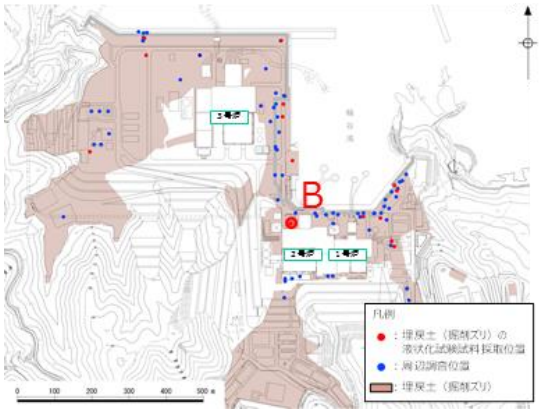
：DA=5%の値を繰り返し回数 N とする

下線：下図に例示する試験結果



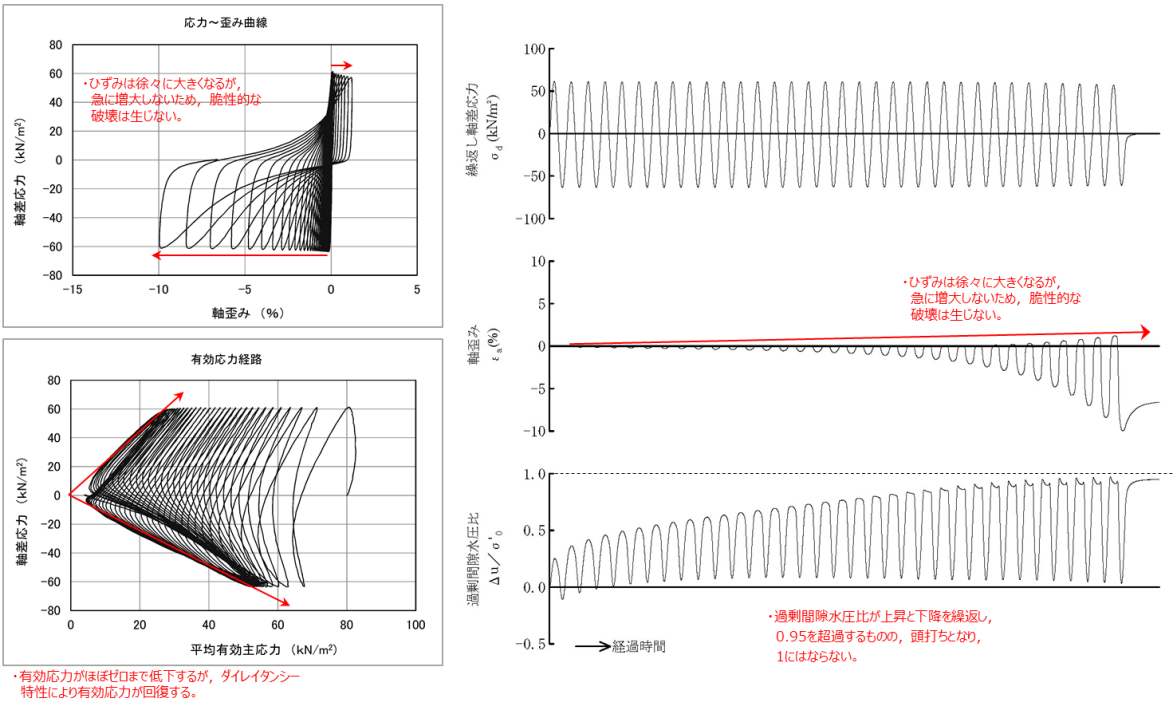
第 3-2-14 図　液状化試験結果の例（A地点の埋戻土（掘削ズリ））

第 3-2-10 表　液状化試験結果（Ｂ地点の埋戻土（掘削ズリ））



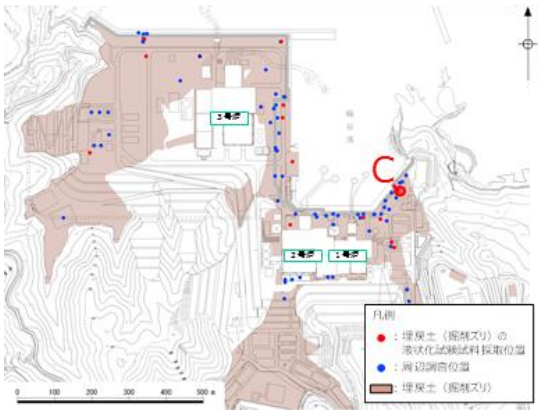
試料番号			B	
深度（m）			0.30～0.90	0.30～0.90
土質材料			埋戻土（掘削ズリ）	
供試体 No.			1	2
土粒子の密度 ρ_s(g/cm^3)			2.684	2.684
圧密応力 σ'_c(kN/m^2)			80	80
繰返し応力振幅比 $\sigma_d/2\sigma'_0$			0.388	0.452
繰返回数	両振幅軸ひずみ	DA = 1%	18.9	12.0
		DA = 2%	24.7	15.0
		DA = 5%	29.8	17.0
		DA = 10%	33.6	19.0
	過剰間隙水圧比 95% N_{u95}		29.0	－

：最大間隙水圧比が 1.0 に近づく(0.95 を超えるもの)
：DA=5%の値を繰り返し回数 N とする
下線：下図に例示する試験結果



第 3-2-15 図　液状化試験結果の例（Ｂ地点の埋戻土（掘削ズリ））

第 3-2-11 表　液状化試験結果（C 地点の埋戻土（掘削ズリ））

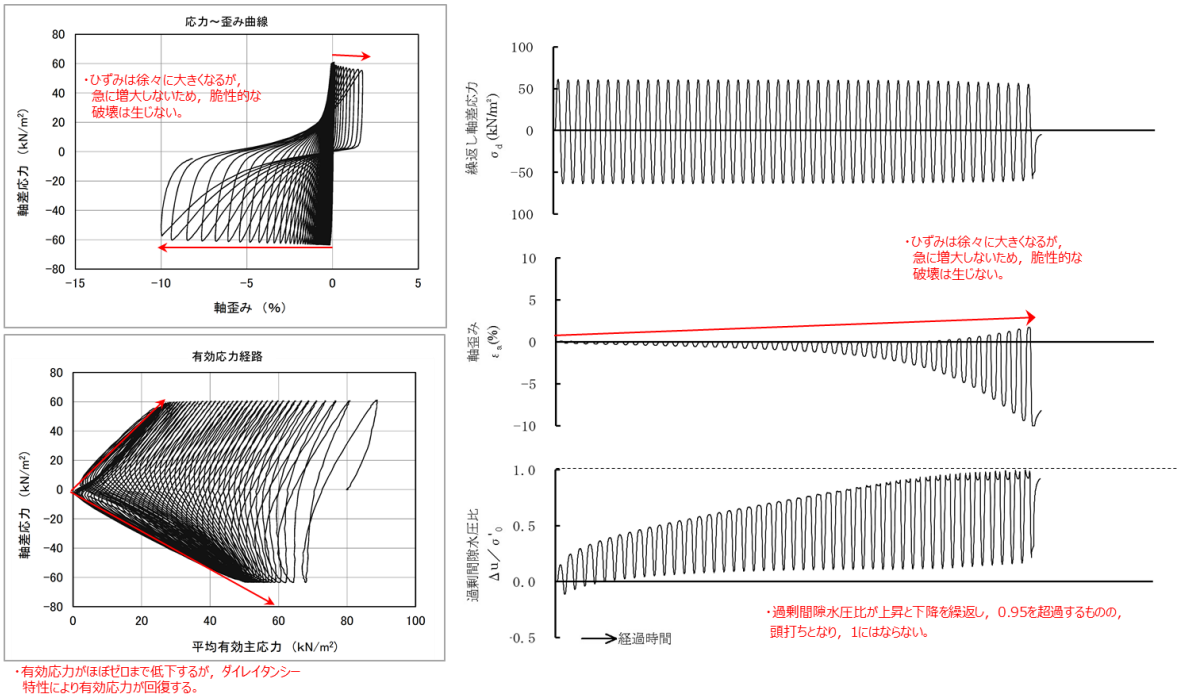


試料番号			C			
深度（m）			0.30～0.90	0.30～0.90	0.30～0.90	0.30～0.90
土質材料			埋戻土（掘削ズリ）			
供試体 No.			1	2	3	4
土粒子の密度 ρ_s(g/cm^3)			2.659	2.659	2.659	2.659
圧密応力 σ'_c(kN/m^2)			120	80	80	80
繰返し応力振幅比 $\sigma_d/2\sigma'_0$			0.350	0.391	0.514	0.655
繰返回数	両振幅軸ひずみ	DA = 1%	28.0	24.0	6.5	1.5
		DA = 2%	36.0	33.0	11.0	4.5
		DA = 5%	42.0	40.0	17.0	8.0
		DA = 10%	47.0	46.0	21.0	10.0
	過剰間隙水圧比 95% N_{u95}		43.0	39.0	18.0	9.5

：最大間隙水圧比が 1.0 に近づく（0.95 を超えるもの）

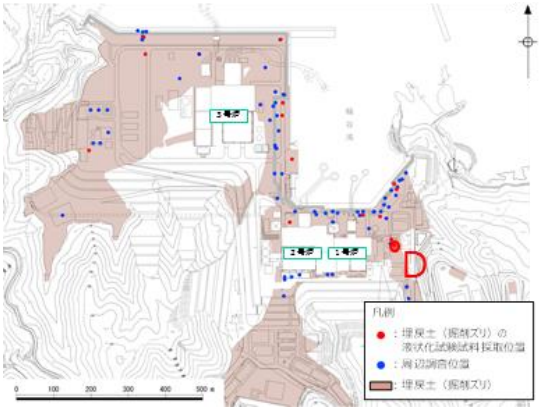
：DA=5%の値を繰り返し回数 N とする

下線：下図に例示する試験結果



第 3-2-16 図　液状化試験結果の例（C 地点の埋戻土（掘削ズリ））

第 3-2-12 表　液状化試験結果（D地点の埋戻土（掘削ズリ））

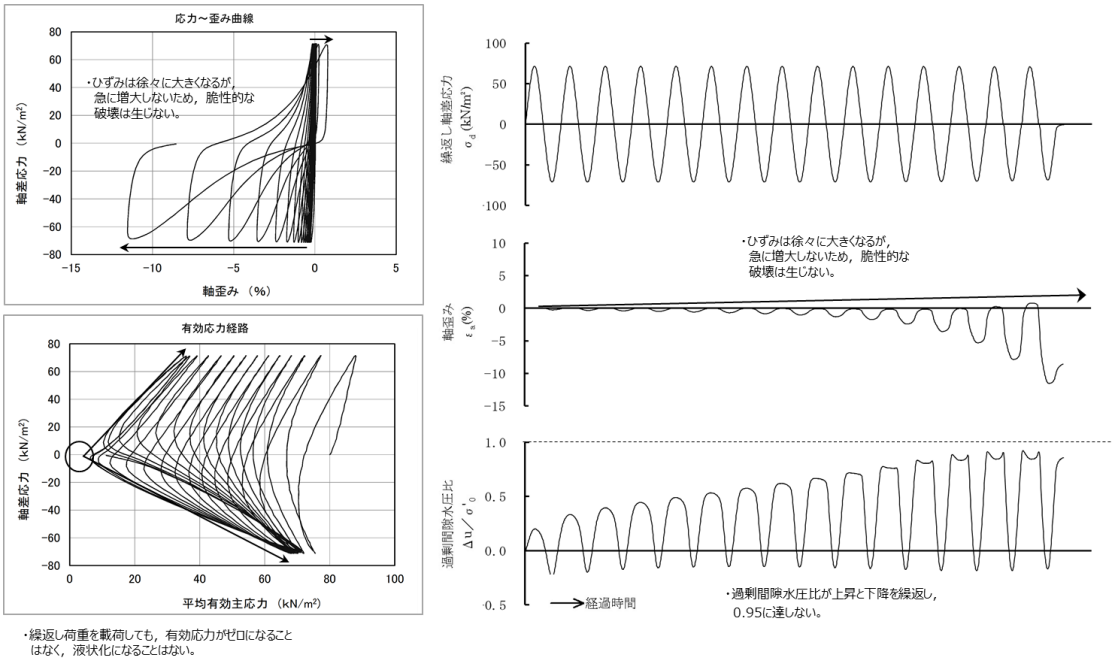


試料番号			D
深度（m）			0.30～0.50
土質材料			埋戻土（掘削ズリ）
供試体 No.			1
土粒子の密度 ρ_s(g/cm^3)			2.653
圧密応力 σ'_c(kN/m^2)			80
繰返し応力振幅比 $\sigma_d/2\sigma'_0$			0.446
繰返回数	軸ひずみ両振幅	DA = 1%	8.5
		DA = 2%	11.0
		DA = 5%	13.0
		DA = 10%	15.0
	過剰間隙水圧比 95% N_{u95}		－

：最大間隙水圧比が 1.0 に近づく(0.95 を超えるもの)

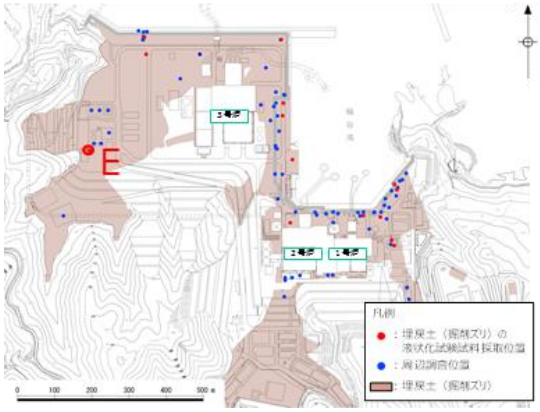
：DA=5%の値を繰り返し回数 N とする

下線：下図に例示する試験結果



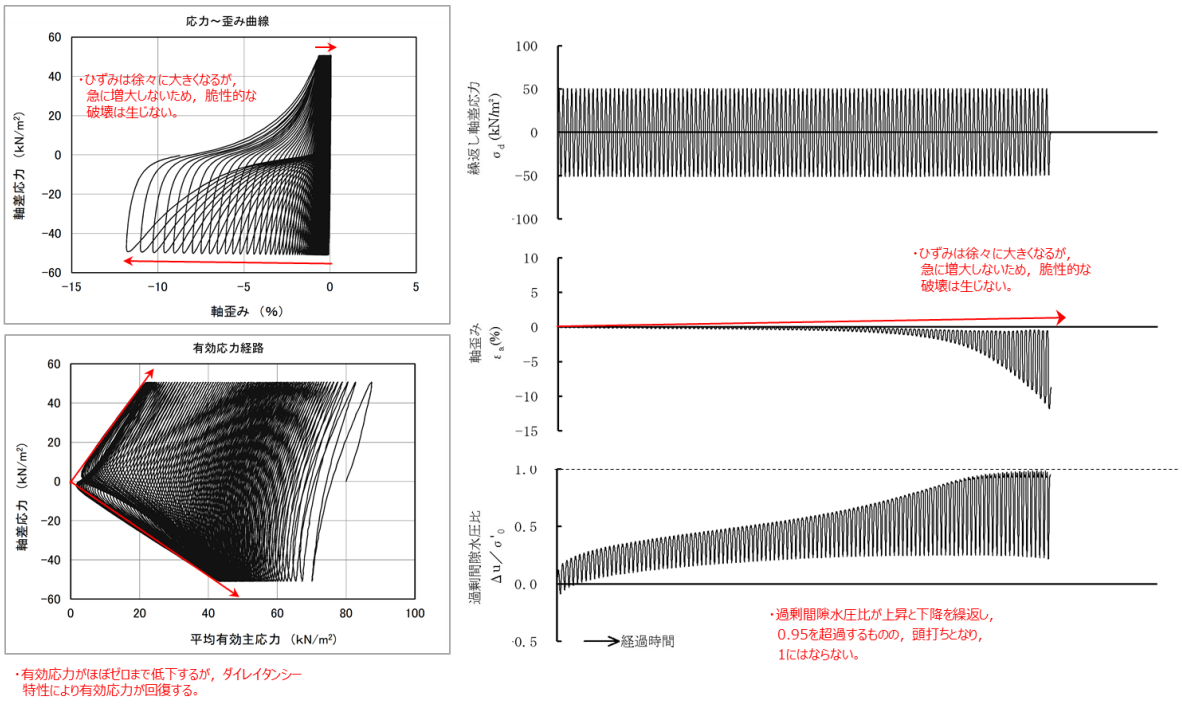
第 3-2-17 図　液状化試験結果の例（D地点の埋戻土（掘削ズリ））

第 3-2-13 表　液状化試験結果（E 地点の埋戻土（掘削ズリ））



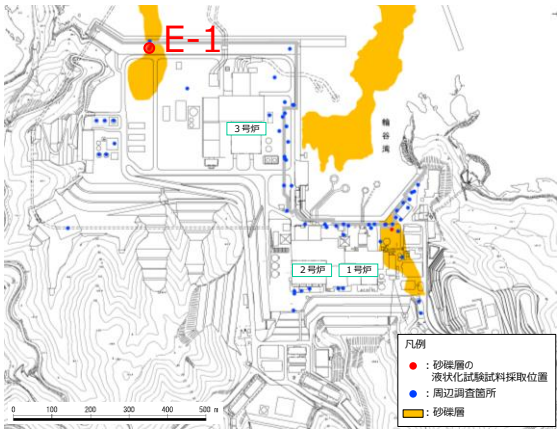
試料番号			E
深度（m）			0.30～0.70
土質材料			埋戻土（掘削ズリ）
供試体 No.			1
土粒子の密度 ρ_s(g/cm^3)			2.678
圧密応力 σ'_c(kN/m^2)			80
繰返し応力振幅比 $\sigma_d/2\sigma'_0$			0.317
繰返し回数	軸ひずみ両振幅	DA = 1%	84.0
		DA = 2%	94.0
		DA = 5%	104.0
		DA = 10%	114.0
	過剰間隙水圧比 95% N_{u95}		100.0

：最大間隙水圧比が 1.0 に近づく(0.95 を超えるもの)
：DA=5%の値を繰り返し回数 N とする
下線：下図に例示する試験結果



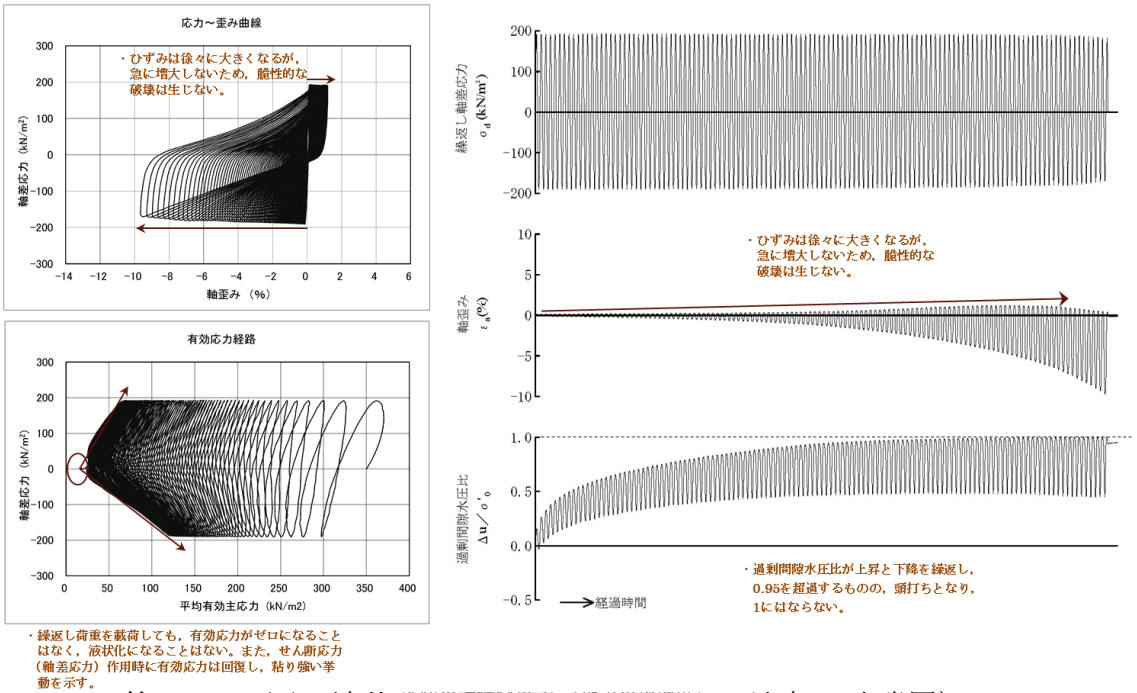
第 3-2-18 図　液状化試験結果の例（E 地点の埋戻土（掘削ズリ））

第3-2-14 表　液状化試験結果（Ｅ－１地点の砂礫層）



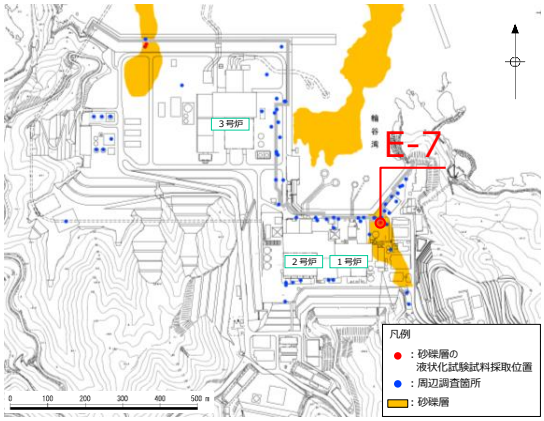
試料番号			S1-23-3		S1-24	S1-25	S1-26
深度（m）			23.93～24.55		24.85～25.55	25.55～26.50	26.50～27.40
土質材料			砂礫層				
供試体 No.			1	2	1	1	1
土粒子の密度 ρ_s(g/cm^3)			2.690		2.685	2.724	2.730
圧密応力 σ'_c(kN/m^2)			350		350	350	350
繰返し応力振幅比 $\sigma_d/2\sigma'_0$			0.301	0.273	0.381	0.281	0.323
繰返回数	両振幅軸ひずみ	DA = 1%	4.5	44.7	1.5	15.1	3.0
		DA = 2%	9.5	66.7	4.5	22.7	5.0
		DA = 5%	18.6	95.0	10.8	33.6	8.5
		DA = 10%	30.6	122.8	19.5	44.7	－
	過剰間隙水圧比 95% N_{u95}		16.0	64.0	9.0	29.0	4.0

：最大間隙水圧比が 1.0 に近づく（0.95 を超えるもの）
：DA=5%の値を繰り返し回数 N とする
下線：下図に例示する試験結果



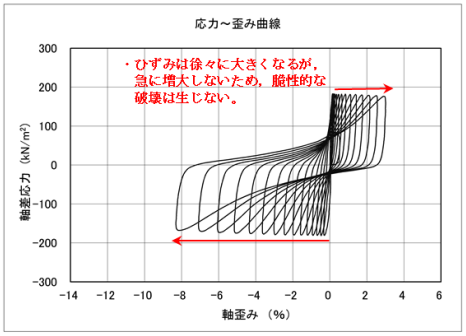
第3-2-19 図　液状化試験結果の例（Ｅ－１地点の砂礫層）

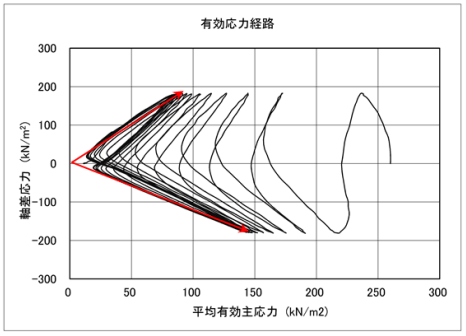
第3-2-15 表　液状化試験結果（Ｅ－７地点の砂礫層）



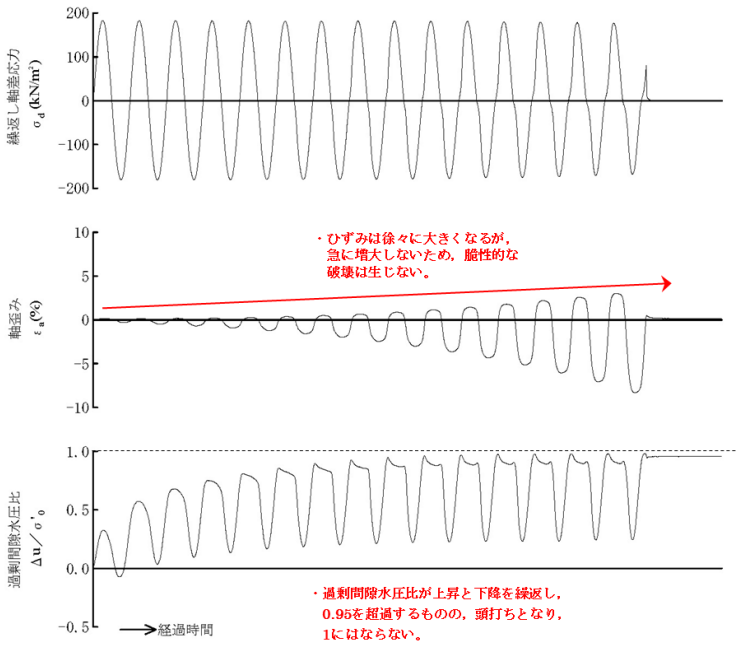
試料番号			S7-15	S7-16		S7-17
深度（m）			15.70～16.60	16.00～16.80		17.60～18.60
土質材料			砂礫層			
供試体 No.			1	1	2	1
土粒子の密度 ρ_s(g/cm^3)			2.702	2.707		2.709
圧密応力 σ'_c(kN/m^2)			260	260		260
繰返し応力振幅比 $\sigma_d/2\sigma'_0$			0.401	0.300	0.350	0.324
繰返回数	軸ひずみ両振幅	DA = 1%	0.7	21.0	3.5	5.5
		DA = 2%	2.0	28.7	6.0	8.0
		DA = 5%	6.0	39.6	10.4	12.3
		DA = 10%	11.8	48.6	14.4	16.4
	過剰間隙水圧比 95% N_{u95}		6.0	27.0	9.0	9.0

：最大間隙水圧比が 1.0 に近づく(0.95 を超えるもの)
：DA=5%の値を繰り返し回数 N とする
下線：下図に例示する試験結果



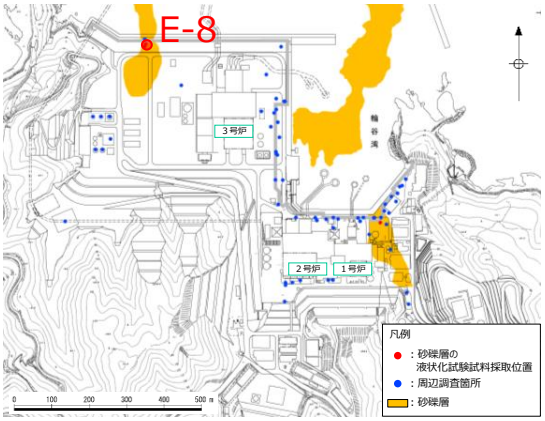


・有効応力がほぼゼロまで低下するが，ダイレイタンシー
特性により有効応力が回復する。



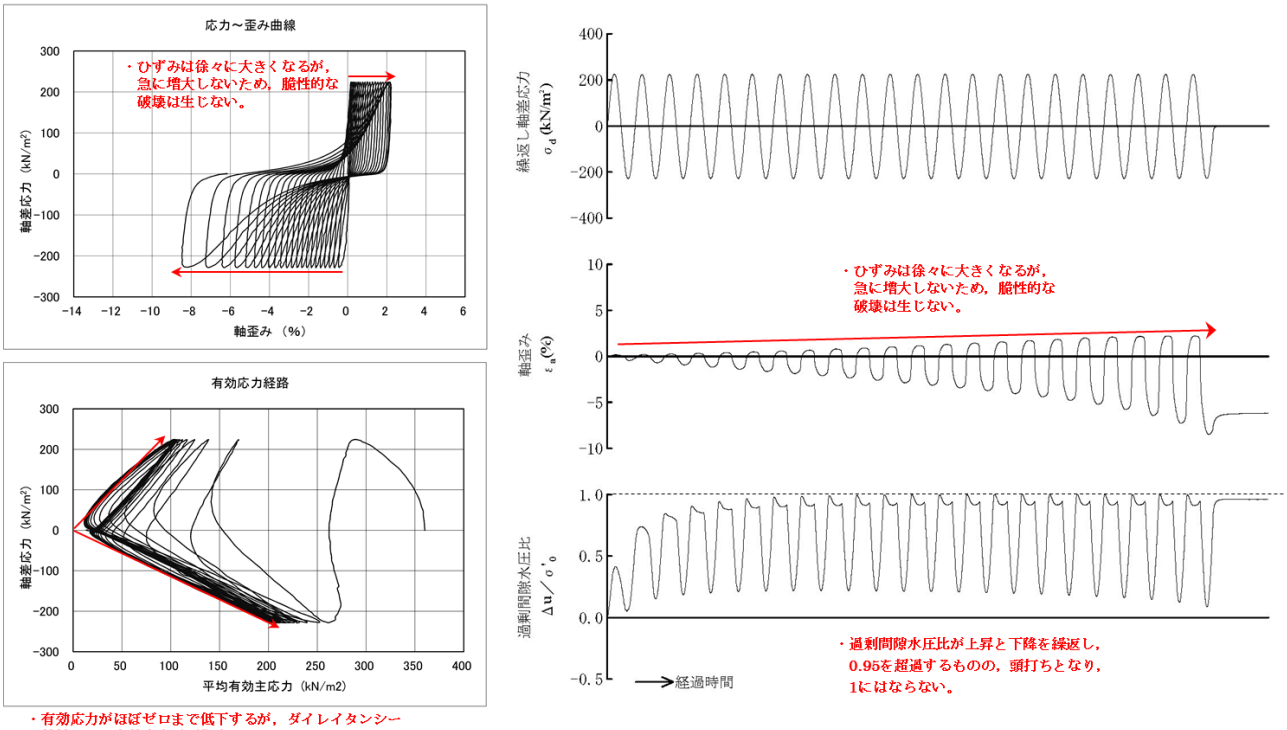
第3-2-20 図　液状化試験結果の例（Ｅ－７地点の砂礫層）

第3-2-16 表　液状化試験結果（Ｅ－８地点の砂礫層）



試料番号			S8-23-1	S8-24		S8-25		
深度（m）			23.00～23.70	24.00～25.00		25.00～26.00		
土質材料			砂礫層					
供試体 No.			1	1	2	1	2	3
土粒子の密度 ρ_s(g/cm^3)			2.700	2.647		2.706		
圧密応力 σ'_c(kN/m^2)			360	360		360		
繰返し応力振幅比 $\sigma_d/2\sigma'_0$			0.302	0.314	0.276	0.301	0.352	0.251
繰返回数	軸ひずみ両振幅	DA = 1%	1.0	2.5	3.0	5.5	0.8	24.7
		DA = 2%	3.5	5.5	7.5	10.0	3.0	38.0
		DA = 5%	10.5	13.7	16.0	17.5	7.5	56.7
		DA = 10%	19.7	21.7	24.5	25.6	13.6	67.9
	過剰間隙水圧比 95% N_{u95}		12.0	5.0	11.0	9.0	5.0	34.0

：最大間隙水圧比が 1.0 に近づく(0.95 を超えるもの)
：DA=5%の値を繰り返し回数 N とする
下線：下図に例示する試験結果



第3-2-21 図　液状化試験結果の例（Ｅ－８地点の砂礫層）

第3-2-17 表　液状化試験結果のまとめ
(a) 埋戻土（掘削ズリ）(1)

	E-2			E-3		
	埋戻土（掘削ズリ）					
試料番号	S2-9※2	S2-10	S2-14-1※2	S3-9-1※2	S3-9-2※2	S3-11※2
過剰間隙水圧比95%を超えない。※1	×	×	×	×	×	×
有効応力がゼロまで低下しない。	×	×	×	○	○	○
液体状となり流動しない。（ひずみが急増しない。）	○	○	○	○	○	○
正のダイレイタンシー特性によりせん断抵抗が作用する。（有効応力が回復する。）	○	○	○	○	○	○
現象の整理	ｻｲｸﾘｯｸ ﾓﾋﾞﾘﾃｨ	ｻｲｸﾘｯｸ ﾓﾋﾞﾘﾃｨ	ｻｲｸﾘｯｸ ﾓﾋﾞﾘﾃｨ	繰返し 軟化	繰返し 軟化	繰返し 軟化

	E-4'				E-5	
	埋戻土（掘削ズリ）					
試料番号	S4-5①※2	S4-5②※2	S4-6	S4-8-2※2	S5-1	S5-3※2
過剰間隙水圧比95%を超えない。※1	×	×	○	○	×	×
有効応力がゼロまで低下しない。	○	○	○	○	○	○
液体状となり流動しない。（ひずみが急増しない。）	○	○	○	○	○	○
正のダイレイタンシー特性によりせん断抵抗が作用する。（有効応力が回復する。）	○	○	○	○	○	○
現象の整理	繰返し 軟化	繰返し 軟化	非液状化	非液状化	繰返し 軟化	繰返し 軟化

	E-6			E-7		
	埋戻土（掘削ズリ）					
試料番号	S6-1-1※2	S6-1-2※2	S6-3①※2	S7-3①	S7-3③※2	S7-3④※2
過剰間隙水圧比95%を超えない。※1	×	×	×	×	×	×
有効応力がゼロまで低下しない。	×	○	×	○	○	○
液体状となり流動しない。（ひずみが急増しない。）	○	○	○	○	○	○
正のダイレイタンシー特性によりせん断抵抗が作用する。（有効応力が回復する。）	○	○	○	○	○	○
現象の整理	ｻｲｸﾘｯｸ ﾓﾋﾞﾘﾃｨ	繰返し 軟化	ｻｲｸﾘｯｸ ﾓﾋﾞﾘﾃｨ	繰返し 軟化	繰返し 軟化	繰返し 軟化

	E-8		
	埋戻土（掘削ズリ）		
試料番号	S8-2※2	S8-4③※2	S8-4④※2
過剰間隙水圧比95%を超えない。※1	×	×	×
有効応力がゼロまで低下しない。	×	○	×
液体状となり流動しない。（ひずみが急増しない。）	○	○	○
正のダイレイタンシー特性によりせん断抵抗が作用する。（有効応力が回復する。）	○	○	○
現象の整理	ｻｲｸﾘｯｸ ﾓﾋﾞﾘﾃｨ	繰返し 軟化	ｻｲｸﾘｯｸ ﾓﾋﾞﾘﾃｨ

※1:JGS 0541-2009において過剰間隙水圧比0.95を液状化の目安としている。
※2:供試体直径の1/5を超える礫を含む一部の供試体についても試験を実施し，液状化判定の参考とした。

第3-2-17 表　液状化試験結果のまとめ
(a) 埋戻土（掘削ズリ）(2)

	A		B		C	
	埋戻土（掘削ズリ）					
試料番号	A①	A②	B①	B②	C①	C②
過剰間隙水圧比95%を超えない。※	×	○	×	○	×	×
有効応力がゼロまで低下しない。	×	○	×	○	×	×
液体状となり流動しない。（ひずみが急増しない。）	○	○	○	○	○	○
正のダイレイタンシー特性によりせん断抵抗が作用する。（有効応力が回復する。）	○	○	○	○	○	○
現象の整理	ｻｲｸﾘｯｸﾓﾋﾞﾘﾃｨ	非液状化	ｻｲｸﾘｯｸﾓﾋﾞﾘﾃｨ	非液状化	ｻｲｸﾘｯｸﾓﾋﾞﾘﾃｨ	ｻｲｸﾘｯｸﾓﾋﾞﾘﾃｨ

	C		D	E
	埋戻土（掘削ズリ）			
試料番号	C③	C④	D①	E①
過剰間隙水圧比95%を超えない。※	×	×	○	×
有効応力がゼロまで低下しない。	×	×	○	×
液体状となり流動しない。（ひずみが急増しない。）	○	○	○	○
正のダイレイタンシー特性によりせん断抵抗が作用する。（有効応力が回復する。）	○	○	○	○
現象の整理	ｻｲｸﾘｯｸﾓﾋﾞﾘﾃｨ	ｻｲｸﾘｯｸﾓﾋﾞﾘﾃｨ	非液状化	ｻｲｸﾘｯｸﾓﾋﾞﾘﾃｨ

※:JGS 0541-2009において過剰間隙水圧比0.95を液状化の目安としている。

第3-2-17 表　液状化試験結果のまとめ
(b) 砂礫層

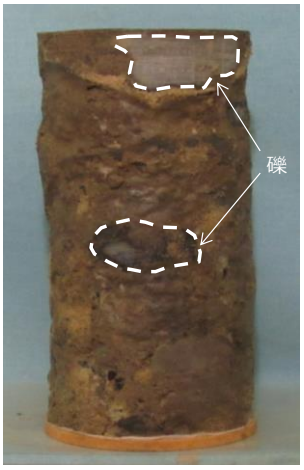
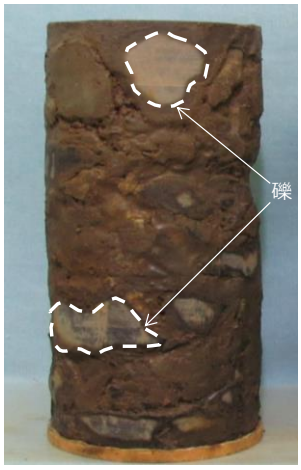
	E-1					E-7
	砂礫層					
試料番号	S1-23-3①※2	S1-23-3②	S1-24	S1-25※2	S1-26※2	S7-15
過剰間隙水圧比95%を超えない。※1	×	×	×	×	×	×
有効応力がゼロまで低下しない。	○	○	○	○	×	○
液体状となり流動しない。（ひずみが急増しない。）	○	○	○	○	○	○
正のダイレイタンシー特性によりせん断抵抗が作用する。（有効応力が回復する。）	○	○	○	○	○	○
現象の整理	繰返し軟化	繰返し軟化	繰返し軟化	繰返し軟化	ｻｲｸﾘｯｸﾓﾋﾞﾘﾃｨ	繰返し軟化

	E-7			E-8		
	砂礫層					
試料番号	S7-16①※2	S7-16②	S7-17	S8-23-1	S8-24①	S8-24②
過剰間隙水圧比95%を超えない。※1	×	×	×	×	×	×
有効応力がゼロまで低下しない。	×	×	○	○	×	×
液体状となり流動しない。（ひずみが急増しない。）	○	○	○	○	○	○
正のダイレイタンシー特性によりせん断抵抗が作用する。（有効応力が回復する。）	○	○	○	○	○	○
現象の整理	ｻｲｸﾘｯｸﾓﾋﾞﾘﾃｨ	ｻｲｸﾘｯｸﾓﾋﾞﾘﾃｨ	繰返し軟化	繰返し軟化	ｻｲｸﾘｯｸﾓﾋﾞﾘﾃｨ	ｻｲｸﾘｯｸﾓﾋﾞﾘﾃｨ

	E-8		
	砂礫層		
試料番号	S8-25①※2	S8-25②	S8-25③
過剰間隙水圧比95%を超えない。※1	×	×	×
有効応力がゼロまで低下しない。	○	○	○
液体状となり流動しない。（ひずみが急増しない。）	○	○	○
正のダイレイタンシー特性によりせん断抵抗が作用する。（有効応力が回復する。）	○	○	○
現象の整理	繰返し軟化	繰返し軟化	繰返し軟化

※1:JGS 0541-2009において過剰間隙水圧比0.95を液状化の目安としている。
※2:供試体直径の1/5を超える礫を含む一部の供試体についても試験を実施し，液状化判定の参考とした。

第3-2-18 表　埋戻土（掘削ズリ）の液状化試験結果（参考値）

	E-3	E-6	E-8
試料番号	S3-9-2	S6-3	S8-2
写真			

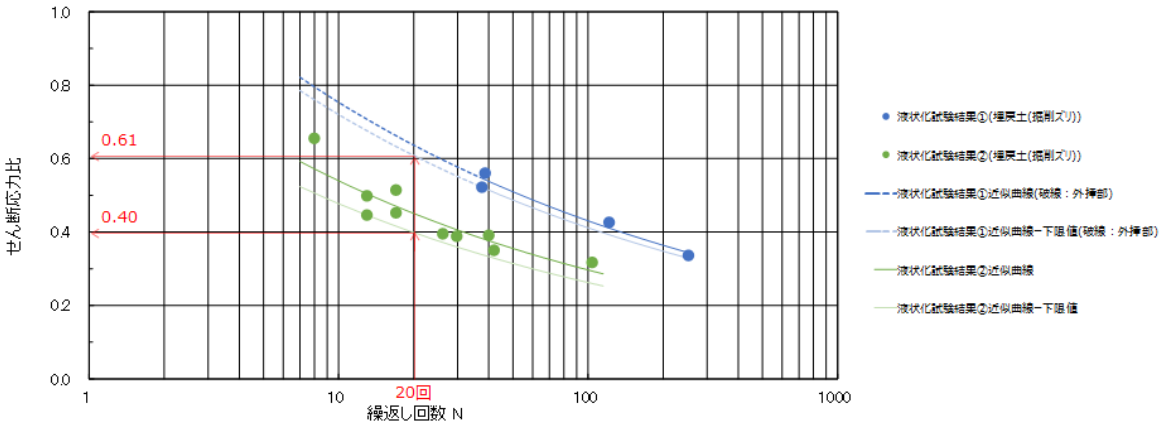
第3-2-19 表　液状化試験結果の分類

対象層	埋戻土（掘削ズリ）	砂礫層
液状化試験の状況	• 過剰間隙水圧比が0.95を上回るが，有効応力は0にならない。 なお，一部の供試体では，過剰間隙水圧比が0.95を下回る。 • 有効応力は減少するが，回復する。 • ひずみが緩やかに上昇する。	• 過剰間隙水圧比が0.95を上回るが，有効応力は0にならない。 • 有効応力は減少するが，回復する。 • ひずみが緩やかに上昇する。
試験結果の分類	• 試験結果は，非液状化又は繰返し軟化（サイクリックモビリティ含む）であり，液状化ではない。 • 有効応力は維持又は回復するため，支持力が期待できる。	• 試験結果は，繰返し軟化（サイクリックモビリティ含む）であり，液状化ではない。 • 有効応力は維持又は回復するため，支持力が期待できる。
基準地震動Ssに対する液状化判定	基準地震動Ssに対する液状化試験の妥当性確認	

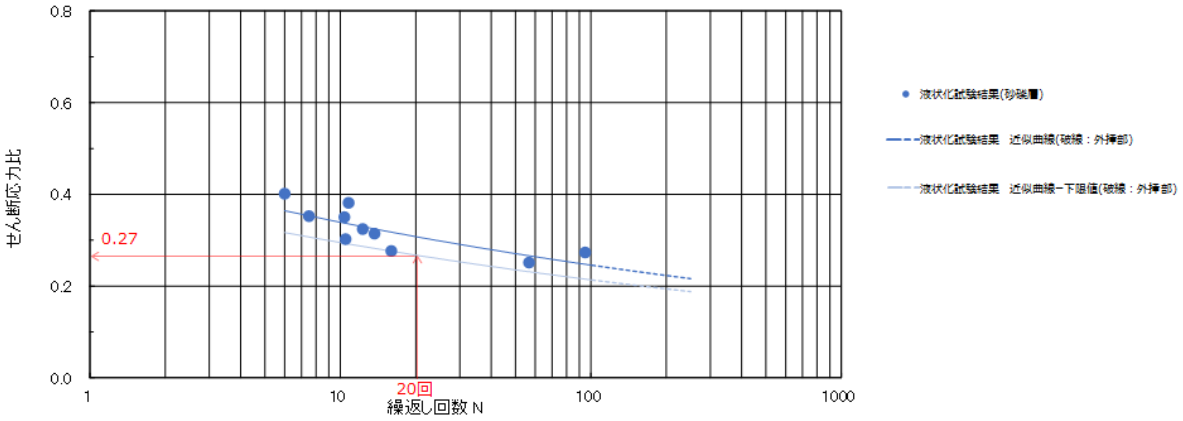
液状化試験結果（埋戻土（掘削ズリ））による液状化強度曲線を第3-2-22図に示す。液状化強度曲線は，試験結果から得られる近似曲線が試験結果の下限値を通るように保守的に設定する。

表層採取試料による供試体は，人工地盤である敷地の被覆層（埋戻土（掘削ズリ））を再現するため粒度調整及び密度調整を行い作製した。一方，敷地の埋立工事から１，２号炉エリアで30年以上，３号炉エリアで10年以上経過しており，被覆層（埋戻土（掘削ズリ））は経年的な圧密を受けていることから，液状化試験結果①（ロータリー式三重管サンプラー）は液状化試験結果②（表層試料採取）の上側に位置する。

上記と同様に，液状化試験結果（砂礫層）による液状化強度曲線を第3-2-23図に示す。



第3-2-22 図　埋戻土（掘削ズリ）の液状化強度曲線



第3-2-23 図　砂礫層の液状化強度曲線

3.3　基準地震動Ｓｓに対する液状化試験の妥当性確認

敷地内の埋戻土（掘削ズリ）及び砂礫層は，試験結果が液状化を示さず，道路橋示方書の液状化判定方法が適用できないと考えられる。このため，液状化試験実施箇所が多い埋戻土（掘削ズリ）について，液状化試験が基準地震動Ｓｓ相当の地盤の状態（繰返し応力及び繰返し回数）を模擬していることを確認する。第3-3-1 図に累積損傷度理論に基づく評価のフローを，第3-3-2 図に累積損傷度理論に基づく等価繰り返し回数の評価方法を示す。

液状化試験が基準地震動Ｓｓ相当の地盤の状態（繰返し応力及び繰返し回数）を模擬していることについて，地震応答解析によって確認するに当たり，代表地震動を使用する。第3-3-3 図に基準地震動Ｓｓの加速度時刻歴波形（水平方向）を示す。

なお，敷地ごとに震源を特定して策定する地震動による基準地震動（Ｓｓ－Ｄ，Ｓｓ－Ｆ１，Ｓｓ－Ｆ２）においては，繰返し応力及び繰返し回数に着目し，水平最大加速度が大きく，継続時間が長い地震動が液状化評価において最も厳しいと考えられることから，Ｓｓ-Ｄを選定する。

液状化試験選定箇所を第3-3-4 図に示す。

埋戻土（掘削ズリ）に対する液状化試験は，埋戻土（掘削ズリ）が３号炉北側西端から１，２号炉北側東端までの全域に分布していることから，網羅性を確保するため，広い範囲において実施した。一方，砂礫層に対する液状化試験は，砂礫層が局所的に分布していることから，分布箇所である３号炉北側西端及び１，２号炉北側東端の地点を選定し実施した。

液状化試験の妥当性確認に当たって，液状化試験箇所が多い埋戻土（掘削ズリ）に対して行った液状化試験を敷地全体の代表として，妥当性確認を行う。なお，妥当性確認を行う地点として，防波壁沿い全線において比較地点①～⑧を選定する。

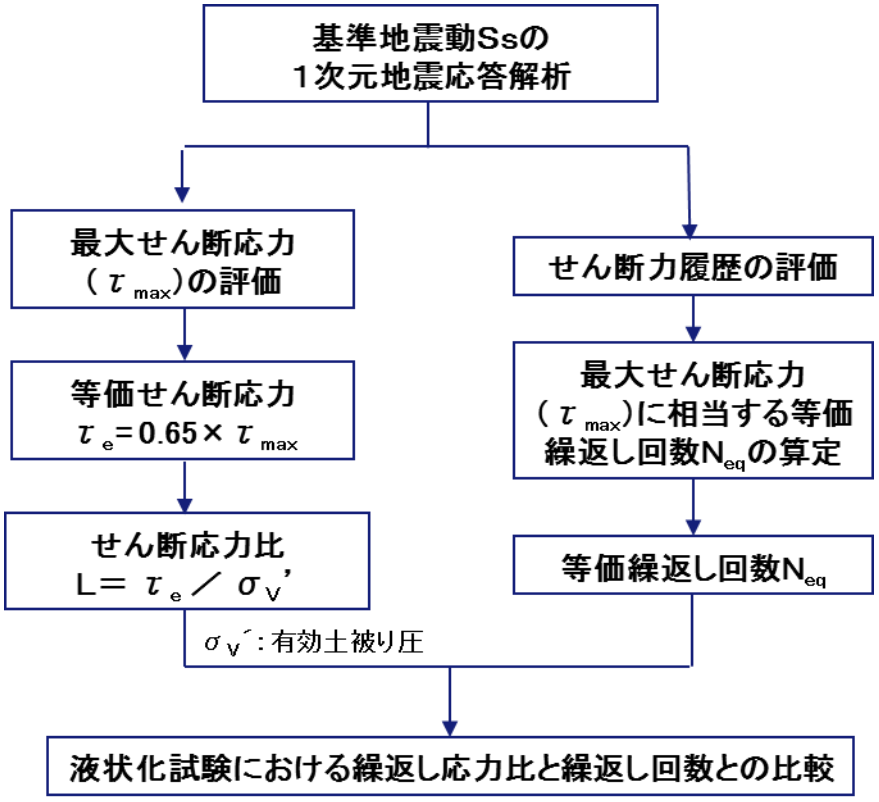
第3-3-5 図に各地点の解析用物性値及び解析モデルを示す。また，評価結果を第3-3-1 表及び第3-3-6 図に示す。

液状化評価対象層のうち埋戻土（掘削ズリ）について，液状化試験結果①（ロータリー式三重管サンプラー）及び液状化試験結果②（表層試料採取）から各せん断応力比に対して所定のせん断ひずみとなる繰返し回数を整理し，１次元地震応答解析の結果を累積損傷度理論に基づいて整理したせん断応力比及び等価繰返し回数と比較した。

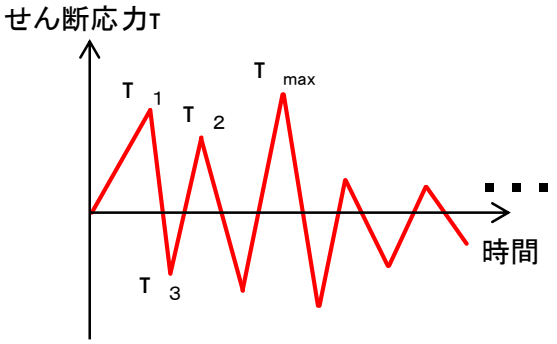
基準地震動Ｓｓ－Ｄ，Ｓｓ－Ｎ１，Ｓｓ－Ｎ２による最大せん断応力比は0.4～0.7程度であり，また，等価繰返し回数は地震動継続時間の長いＳｓ－Ｄを除き数10～300回程度であり，液状化試験と同程度であることから，今回実施した液状化試験は，当該地盤の基準地震動Ｓｓ相当が作用した状態を概ね再現できていると判断した。

なお，Ｓｓ－Ｄによる等価繰返し回数は地震動継続時間が長いため500～1,000回程度となるが，一方で液状化試験においてＳｓ－Ｄによるせん断応力比を作用

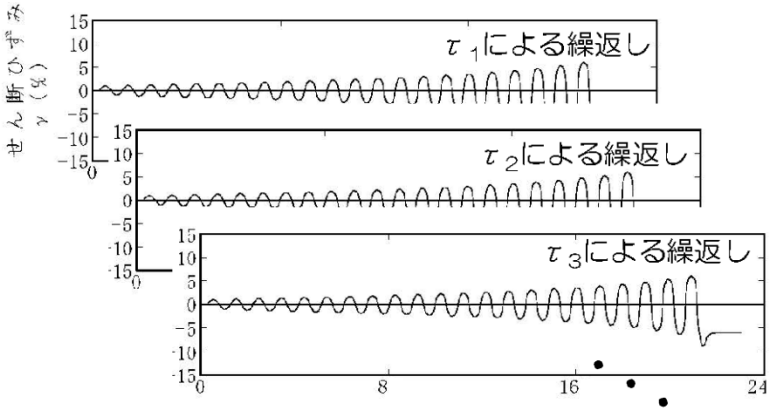
させた場合，両振幅ひずみが５％となる繰返し回数は，近似曲線から５～30回程度となる。埋戻土（掘削ズリ）は液状化試験結果から，非液状化又は繰返し軟化（サイクリックモビリティ含む）を示すため，繰返し回数による直接的な比較が難しい材料であるが，Ｓｓ－Ｄのせん断応力比に相当する試験を実施していることから概ね再現できていると判断した。



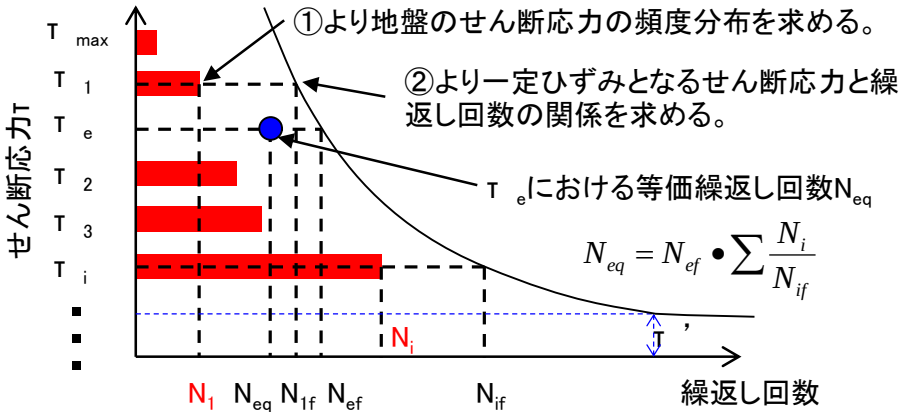
第3-3-1 図　累積損傷度理論に基づく等価繰り返し回数の評価のフロー



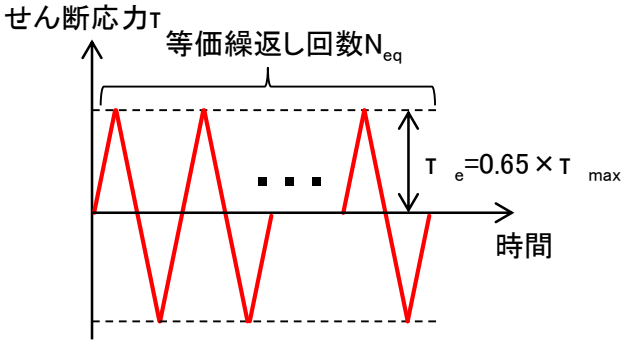
①対象地盤の地震応答解析におけるせん断応力履歴



②試験による一定せん断応力振幅時の繰返し回数とせん断ひずみ

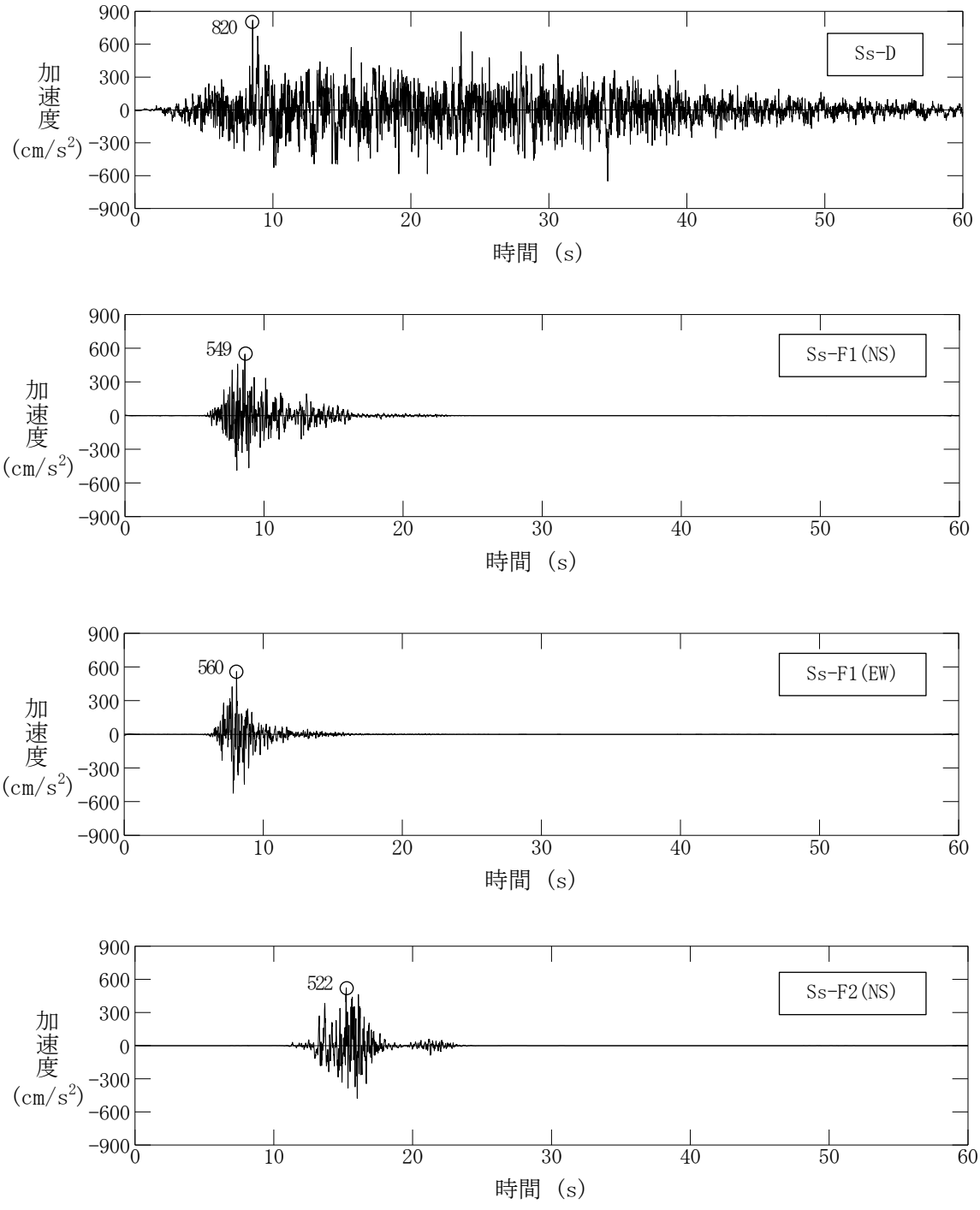


③累積損傷度理論に基づく等価繰返し回数の評価方法

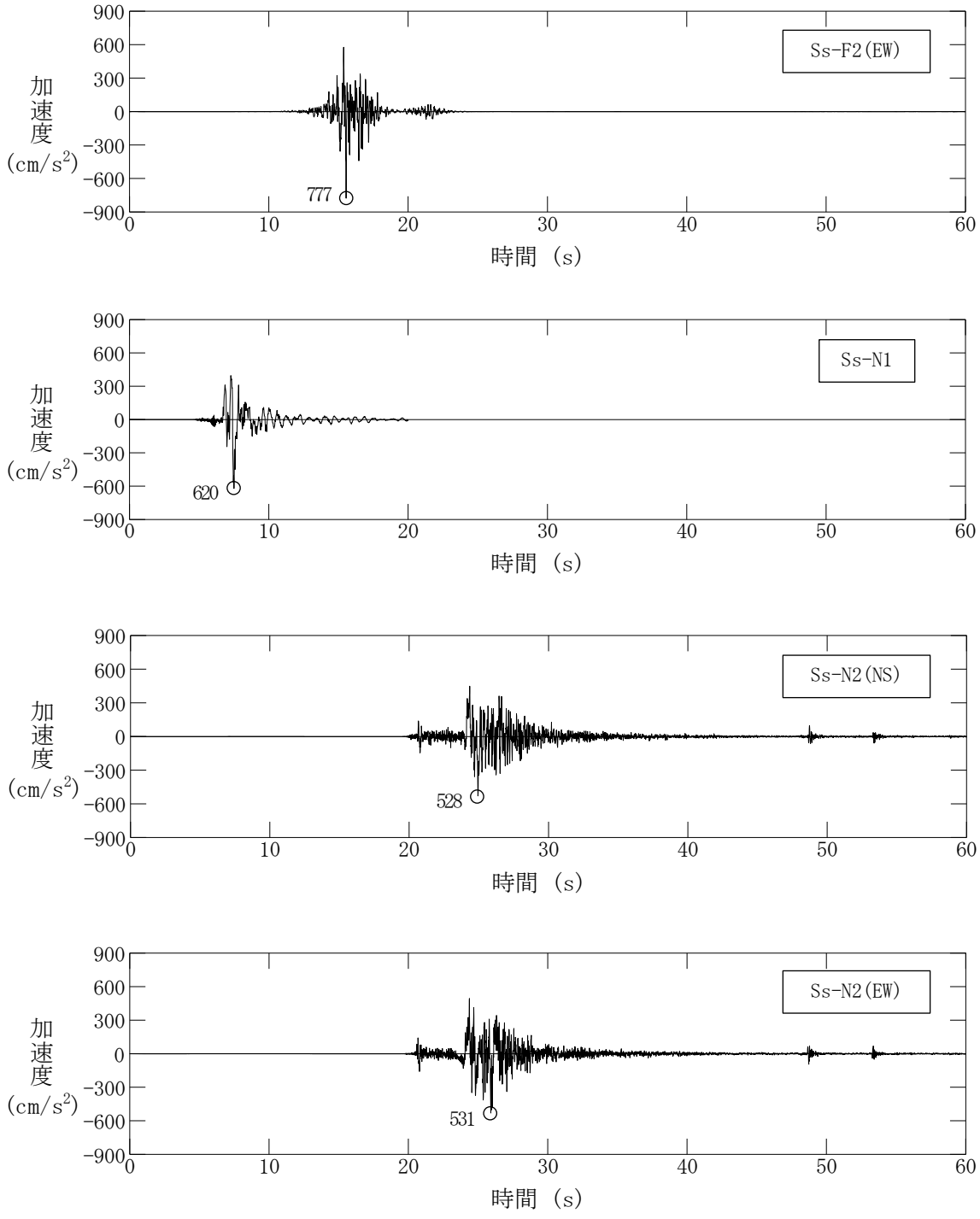


④対象地盤の地震応答解析と等価な一定せん断応力比と等価繰返し回数

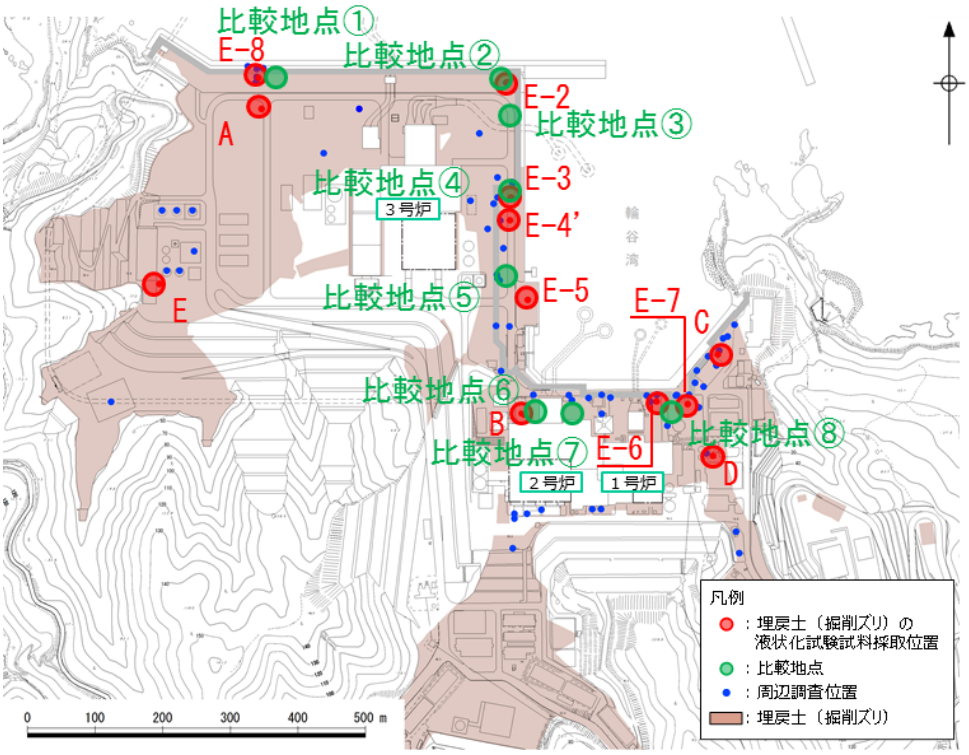
第3-3-2 図　累積損傷度理論に基づく等価繰り返し回数の評価方法



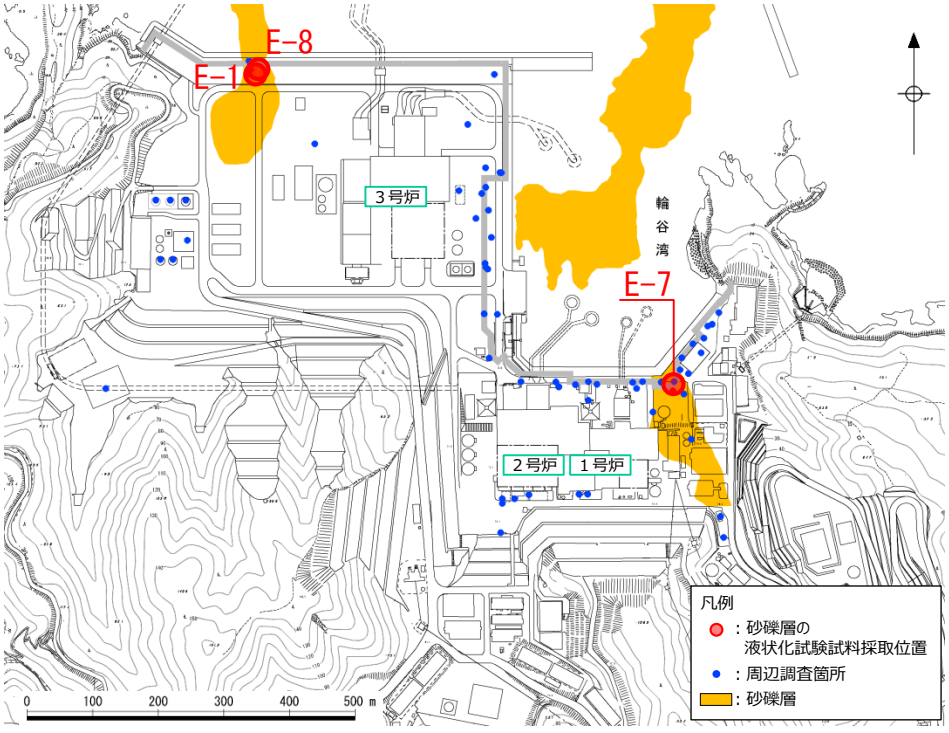
第3-3-3 図　基準地震動の加速度時刻歴波形（水平方向）
（Ｓｓ－Ｄ，Ｓｓ－Ｆ１(ＮＳ)，Ｓｓ－Ｆ１(ＥＷ)，Ｓｓ－Ｆ２(ＮＳ)）



第3-3-3 図　基準地震動の加速度時刻歴波形（水平方向）
（Ｓｓ－Ｆ２(ＥＷ)，Ｓｓ－Ｎ１，Ｓｓ－Ｎ２(ＮＳ)，Ｓｓ－Ｎ２(ＥＷ)）

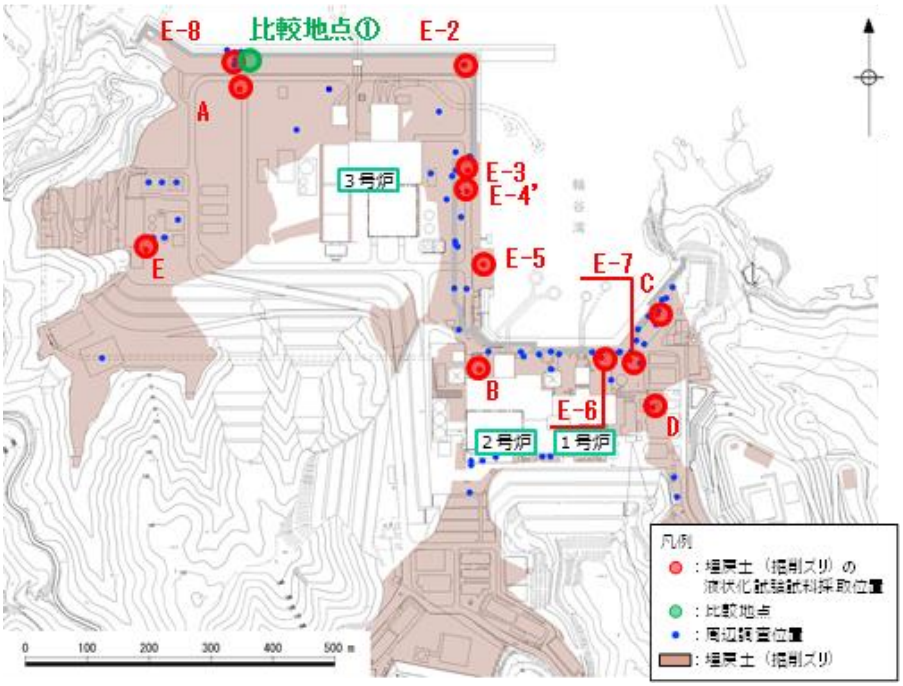


埋戻土（掘削ズリ）



砂礫層

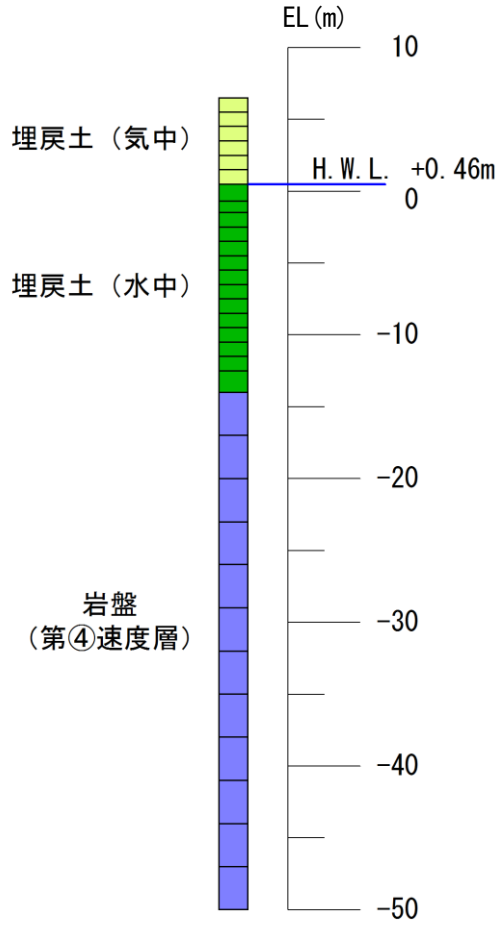
第3-3-4 図　液状化試験試料採取位置



地盤物性値

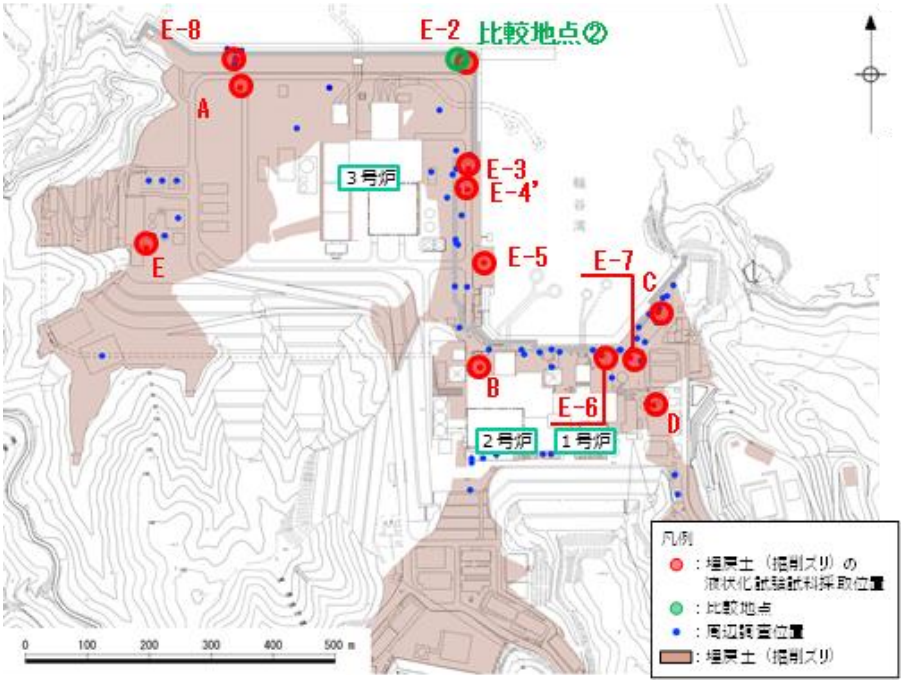
土層	標高 (EL m)		深度 (G.L.-m)	有効上載荷重 σ_v' (kN/m^2)	単位体積重量 飽和，湿潤 γ_{sat},γ_t (kN/m^3)	単位体積重量 水中 γ' (kN/m^3)	せん断波速度 V_s (m/s)	初期せん断弾性係数 G_0※1 (kN/m^2)
埋戻土(気中)	6.500	5.500	1.000	9.800	19.6	—	—	35370
	5.500	4.500	2.000	29.400	19.6	—	—	73050
	4.500	3.500	3.000	49.000	19.6	—	—	102300
	3.500	2.500	4.000	68.600	19.6	—	—	127800
	2.500	1.500	5.000	88.200	19.6	—	—	150800
	1.500	0.460	6.040	108.192	19.6	—	—	172600
埋戻土(水中)	0.460	-0.700	7.200	124.532	20.7	10.6	—	189400
	-0.700	-1.500	8.000	134.920	20.7	10.6	—	199700
	-1.500	-2.500	9.000	144.460	20.7	10.6	—	208900
	-2.500	-3.500	10.000	155.060	20.7	10.6	—	218900
	-3.500	-4.500	11.000	165.660	20.7	10.6	—	228600
	-4.500	-5.500	12.000	176.260	20.7	10.6	—	238200
	-5.500	-6.500	13.000	186.860	20.7	10.6	—	247600
	-6.500	-7.500	14.000	197.460	20.7	10.6	—	256700
	-7.500	-8.500	15.000	208.060	20.7	10.6	—	265800
	-8.500	-9.500	16.000	218.660	20.7	10.6	—	274600
	-9.500	-10.500	17.000	229.260	20.7	10.6	—	283300
	-10.500	-11.500	18.000	239.860	20.7	10.6	—	291900
	-11.500	-12.500	19.000	250.460	20.7	10.6	—	300400
	-12.500	-14.000	20.500	263.710	20.7	10.6	—	310800
岩盤 (第④速度層)	-14.000	-17.000	23.500	293.260	24.5	14.4	1520	—
	-17.000	-20.000	26.500	336.460	24.5	14.4	1520	—
	-20.000	-23.000	29.500	379.660	24.5	14.4	1520	—
	-23.000	-26.000	32.500	422.860	24.5	14.4	1520	—
	-26.000	-29.000	35.500	466.060	24.5	14.4	1520	—
	-29.000	-32.000	38.500	509.260	24.5	14.4	1520	—
	-32.000	-35.000	41.500	552.460	24.5	14.4	1520	—
	-35.000	-38.000	44.500	595.660	24.5	14.4	1520	—
	-38.000	-41.000	47.500	638.860	24.5	14.4	1520	—
	-41.000	-44.000	50.500	682.060	24.5	14.4	1520	—
	-44.000	-47.000	53.500	725.260	24.5	14.4	1520	—
	-47.000	-50.000	56.500	768.460	24.5	14.4	1520	—

※1 掘削ズリ：$G_0=749\sigma_v'^{0.66}$ (N/mm^2)



(a) 基本物性（比較地点①）

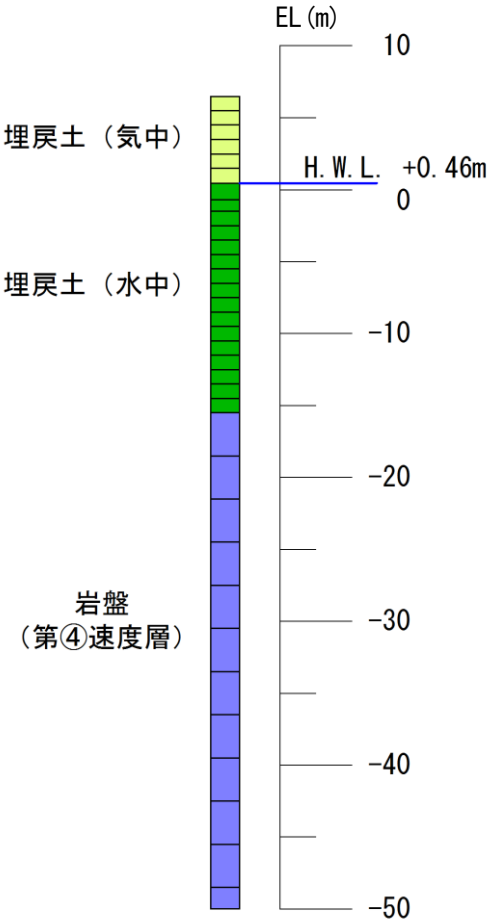
第3-3-5 図　解析用物性値及び解析モデル



地盤物性値

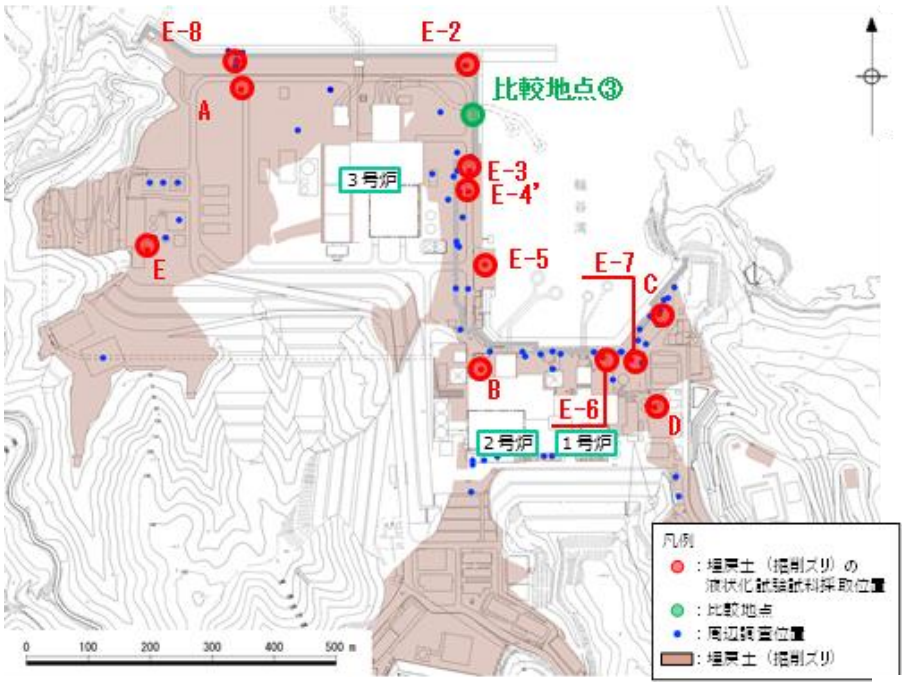
土層	標高 (EL m)		深度 (G.L.-m)	有効上載荷重 σ_v' (kN/m^2)	単位体積重量 飽和，湿潤 γ_{sat},γ_t (kN/m^3)	単位体積重量 水中 γ' (kN/m^3)	せん断波速度 V_s (m/s)	初期せん断弾性係数 G_0※1 (kN/m^2)
埋戻土(気中)	6.500	5.500	1.000	9.800	19.6	—	—	35370
	5.500	4.500	2.000	29.400	19.6	—	—	73050
	4.500	3.500	3.000	49.000	19.6	—	—	102300
	3.500	2.500	4.000	68.600	19.6	—	—	127800
	2.500	1.500	5.000	88.200	19.6	—	—	150800
	1.500	0.460	6.040	108.192	19.6	—	—	172600
埋戻土(水中)	0.460	-0.700	7.200	124.532	20.7	10.6	—	189400
	-0.700	-1.500	8.000	134.920	20.7	10.6	—	199700
	-1.500	-2.500	9.000	144.460	20.7	10.6	—	208900
	-2.500	-3.500	10.000	155.060	20.7	10.6	—	218900
	-3.500	-4.500	11.000	165.660	20.7	10.6	—	228600
	-4.500	-5.500	12.000	176.260	20.7	10.6	—	238200
	-5.500	-6.500	13.000	186.860	20.7	10.6	—	247600
	-6.500	-7.500	14.000	197.460	20.7	10.6	—	256700
	-7.500	-8.500	15.000	208.060	20.7	10.6	—	265800
	-8.500	-9.500	16.000	218.660	20.7	10.6	—	274600
	-9.500	-10.500	17.000	229.260	20.7	10.6	—	283300
	-10.500	-11.500	18.000	239.860	20.7	10.6	—	291900
	-11.500	-12.500	19.000	250.460	20.7	10.6	—	300400
	-12.500	-13.500	20.000	261.060	20.7	10.6	—	308700
	-13.500	-14.500	21.000	271.660	20.7	10.6	—	316900
	-14.500	-15.500	22.000	282.260	20.7	10.6	—	325000
岩盤 (第④速度層)	-15.500	-18.500	25.000	309.160	24.5	14.4	1520	—
	-18.500	-21.500	28.000	352.360	24.5	14.4	1520	—
	-21.500	-24.500	31.000	395.560	24.5	14.4	1520	—
	-24.500	-27.500	34.000	438.760	24.5	14.4	1520	—
	-27.500	-30.500	37.000	481.960	24.5	14.4	1520	—
	-30.500	-33.500	40.000	525.160	24.5	14.4	1520	—
	-33.500	-36.500	43.000	568.360	24.5	14.4	1520	—
	-36.500	-39.500	46.000	611.560	24.5	14.4	1520	—
	-39.500	-42.500	49.000	654.760	24.5	14.4	1520	—
	-42.500	-45.500	52.000	697.960	24.5	14.4	1520	—
	-45.500	-48.500	55.000	741.160	24.5	14.4	1520	—
	-48.500	-50.000	56.500	773.560	24.5	14.4	1520	—

※1 掘削ズリ：$G_0=749\sigma_v'^{0.66}$ (N/mm^2)



(b) 基本物性（比較地点②）

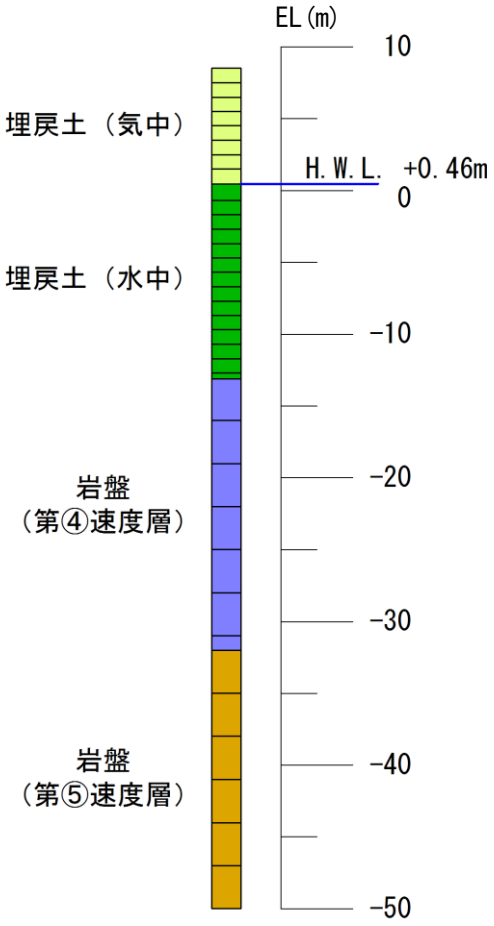
第3-3-5 図　解析用物性値及び解析モデル



地盤物性値

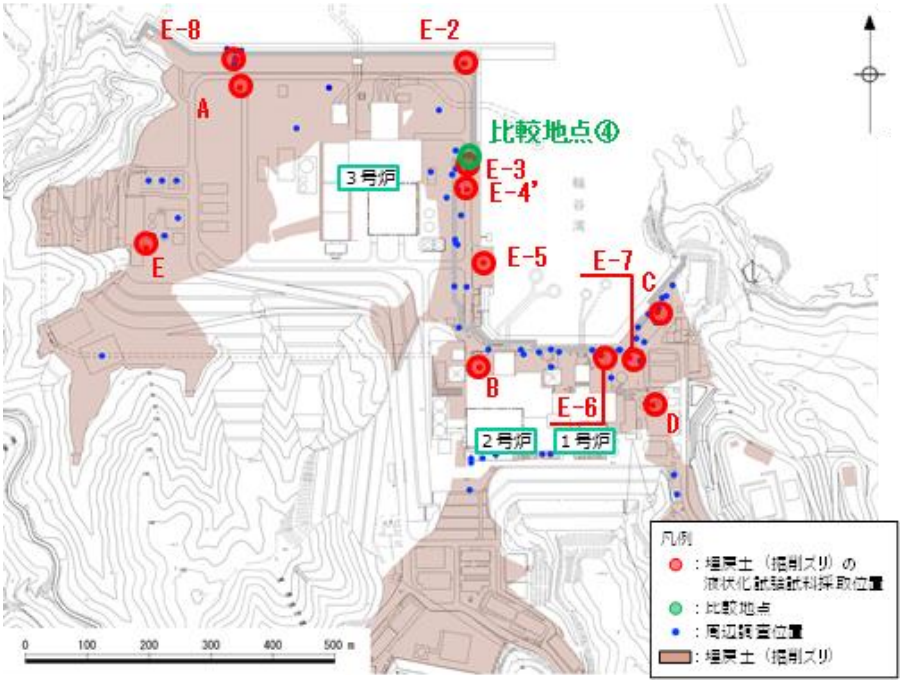
土層	標高 (EL m)	深度 (G.L.-m)	有効上載荷重 σ_v' (kN/m^2)	単位体積重量 飽和，湿潤 γ_{sat},γ_t (kN/m^3)	単位体積重量 水中 γ' (kN/m^3)	せん断波速度 V_s (m/s)	初期せん断弾性係数 G_0 ※1 (kN/m^2)
埋戻土(気中)	8.500 ～ 7.500	1.000	9.800	19.6	—	—	35370
	7.500 ～ 6.500	2.000	29.400	19.6	—	—	73050
	6.500 ～ 5.500	3.000	49.000	19.6	—	—	102300
	5.500 ～ 4.500	4.000	68.600	19.6	—	—	127800
	4.500 ～ 3.500	5.000	88.200	19.6	—	—	150800
	3.500 ～ 2.500	6.000	107.800	19.6	—	—	172200
	2.500 ～ 1.500	7.000	127.400	19.6	—	—	192300
	1.500 ～ 0.460	8.040	147.392	19.6	—	—	211700
埋戻土(水中)	0.460 ～ -0.700	9.200	163.732	20.7	10.6	—	226900
	-0.700 ～ -1.700	10.200	175.180	20.7	10.6	—	237200
	-1.700 ～ -2.700	11.200	185.780	20.7	10.6	—	246600
	-2.700 ～ -3.700	12.200	196.380	20.7	10.6	—	255800
	-3.700 ～ -4.700	13.200	206.980	20.7	10.6	—	264800
	-4.700 ～ -5.700	14.200	217.580	20.7	10.6	—	273700
	-5.700 ～ -6.700	15.200	228.180	20.7	10.6	—	282500
	-6.700 ～ -7.700	16.200	238.780	20.7	10.6	—	291000
	-7.700 ～ -8.700	17.200	249.380	20.7	10.6	—	299500
	-8.700 ～ -9.700	18.200	259.980	20.7	10.6	—	307900
	-9.700 ～ -10.700	19.200	270.580	20.7	10.6	—	316100
	-10.700 ～ -11.700	20.200	281.180	20.7	10.6	—	324200
	-11.700 ～ -12.700	21.200	291.780	20.7	10.6	—	332200
	-12.700 ～ -13.125	21.625	299.333	20.7	10.6	—	337900
岩盤 (第④速度層)	-13.125 ～ -16.000	24.500	322.285	24.5	14.4	1520	—
	-16.000 ～ -19.000	27.500	364.585	24.5	14.4	1520	—
	-19.000 ～ -22.000	30.500	407.785	24.5	14.4	1520	—
	-22.000 ～ -25.000	33.500	450.985	24.5	14.4	1520	—
	-25.000 ～ -28.000	36.500	494.185	24.5	14.4	1520	—
	-28.000 ～ -31.000	39.500	537.385	24.5	14.4	1520	—
	-31.000 ～ -32.000	40.500	566.185	24.5	14.4	1520	—
岩盤 (第⑤速度層)	-32.000 ～ -35.000	43.500	596.035	25.2	15.1	1900	—
	-35.000 ～ -38.000	46.500	641.335	25.2	15.1	1900	—
	-38.000 ～ -41.000	49.500	686.635	25.2	15.1	1900	—
	-41.000 ～ -44.000	52.500	731.935	25.2	15.1	1900	—
	-44.000 ～ -47.000	55.500	777.235	25.2	15.1	1900	—
	-47.000 ～ -50.000	58.500	822.535	25.2	15.1	1900	—

※1 掘削ズリ：$G_0=749\sigma_v^{0.66}$ (N/mm^2)



（c） 基本物性（比較地点③）

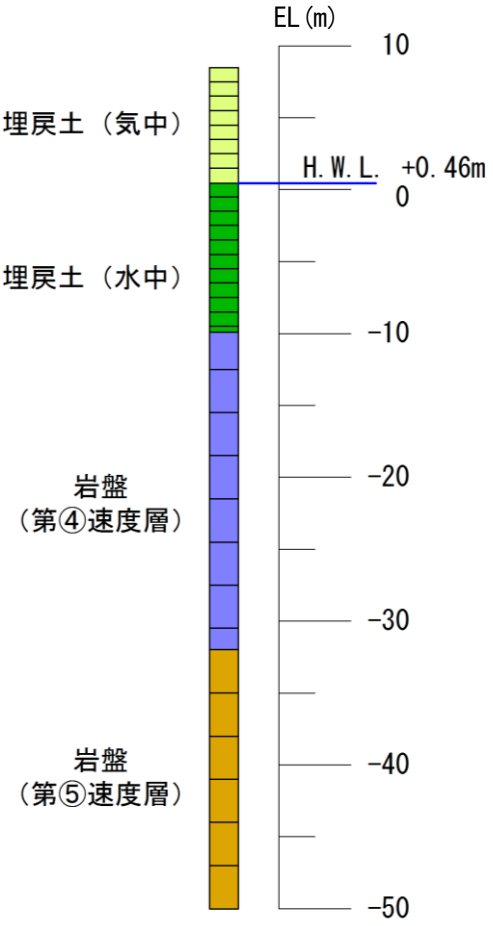
第3-3-5 図　解析用物性値及び解析モデル



地盤物性値

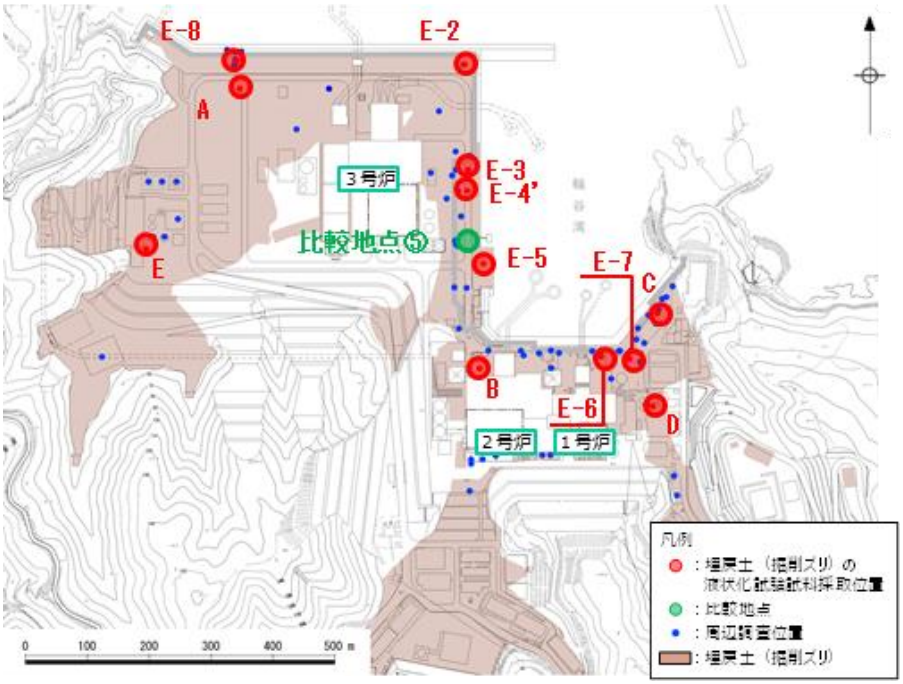
土層	標高 (EL m)	深度 (G.L.-m)	有効上載荷重 σ_v' (kN/m^2)	単位体積重量 飽和，湿潤 γ_{sat},γ_t (kN/m^3)	単位体積重量 水中 γ' (kN/m^3)	せん断波速度 V_s (m/s)	初期せん断弾性係数 G_0 (kN/m^2)
埋戻土(気中)	8.500 ～ 7.500	1.000	9.800	19.6	—	—	35370
	7.500 ～ 6.500	2.000	29.400	19.6	—	—	73050
	6.500 ～ 5.500	3.000	49.000	19.6	—	—	102300
	5.500 ～ 4.500	4.000	68.600	19.6	—	—	127800
	4.500 ～ 3.500	5.000	88.200	19.6	—	—	150800
	3.500 ～ 2.500	6.000	107.800	19.6	—	—	172200
	2.500 ～ 1.500	7.000	127.400	19.6	—	—	192300
	1.500 ～ 0.460	8.040	147.392	19.6	—	—	211700
埋戻土(水中)	0.460 ～ -0.500	9.000	162.672	20.7	10.6	—	225900
	-0.500 ～ -1.500	10.000	173.060	20.7	10.6	—	235300
	-1.500 ～ -2.500	11.000	183.660	20.7	10.6	—	244800
	-2.500 ～ -3.500	12.000	194.260	20.7	10.6	—	254000
	-3.500 ～ -4.500	13.000	204.860	20.7	10.6	—	263100
	-4.500 ～ -5.500	14.000	215.460	20.7	10.6	—	272000
	-5.500 ～ -6.500	15.000	226.060	20.7	10.6	—	280700
	-6.500 ～ -7.500	16.000	236.660	20.7	10.6	—	289300
	-7.500 ～ -8.500	17.000	247.260	20.7	10.6	—	297800
	-8.500 ～ -9.500	18.000	257.860	20.7	10.6	—	306200
	-9.500 ～ -9.892	18.392	265.238	20.7	10.6	—	311900
岩盤 (第④速度層)	-9.892 ～ -12.500	21.000	286.093	24.5	14.4	1520	—
	-12.500 ～ -15.500	24.000	326.470	24.5	14.4	1520	—
	-15.500 ～ -18.500	27.000	369.670	24.5	14.4	1520	—
	-18.500 ～ -21.500	30.000	412.870	24.5	14.4	1520	—
	-21.500 ～ -24.500	33.000	456.070	24.5	14.4	1520	—
	-24.500 ～ -27.500	36.000	499.270	24.5	14.4	1520	—
	-27.500 ～ -30.500	39.000	542.470	24.5	14.4	1520	—
	-30.500 ～ -32.000	40.500	574.870	24.5	14.4	1520	—
岩盤 (第⑤速度層)	-32.000 ～ -35.000	43.500	608.320	25.2	15.1	1900	—
	-35.000 ～ -38.000	46.500	653.620	25.2	15.1	1900	—
	-38.000 ～ -41.000	49.500	698.920	25.2	15.1	1900	—
	-41.000 ～ -44.000	52.500	744.220	25.2	15.1	1900	—
	-44.000 ～ -47.000	55.500	789.520	25.2	15.1	1900	—
	-47.000 ～ -50.000	58.500	834.820	25.2	15.1	1900	—

※1 掘削ズリ：$G_0=749\sigma_v^{0.66}$ (N/mm^2)



（d）基本物性（比較地点④）

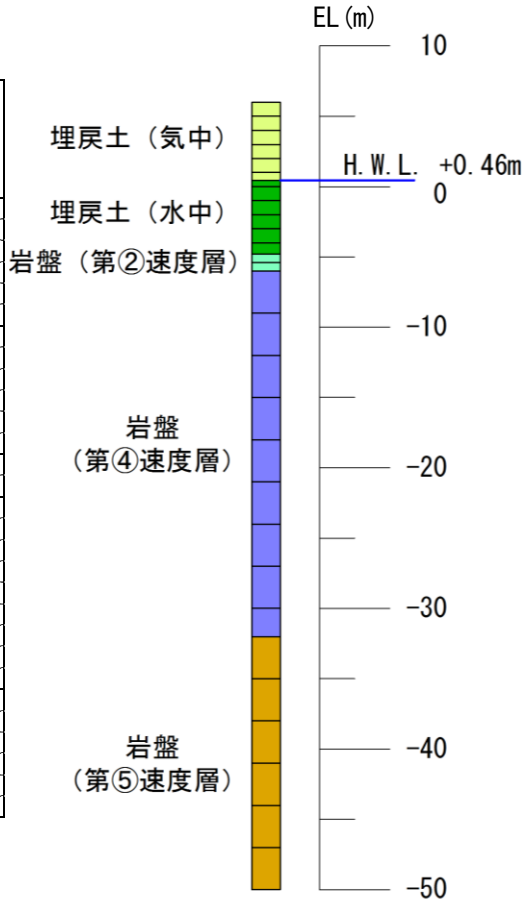
第3-3-5 図　解析用物性値及び解析モデル



地盤物性値

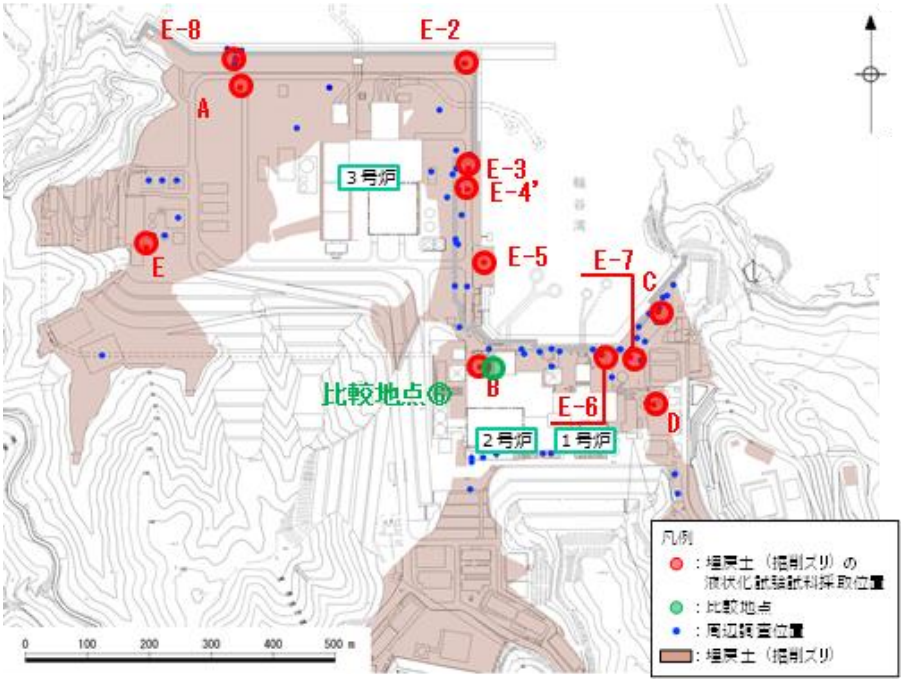
土層	標高 (EL m)			深度 (G.L.-m)	有効上載荷重 σ_v' (kN/m^2)	単位体積重量		せん断波速度 V_s (m/s)	初期せん断弾性係数 G_0 ※1 (kN/m^2)
						飽和，湿潤 γ_{sat},γ_t (kN/m^3)	水中 γ' (kN/m^3)		
埋戻土(気中)	6.000	～	5.000	1.000	9.800	19.6	—	—	35370
	5.000	～	4.000	2.000	29.400	19.6	—	—	73050
	4.000	～	3.000	3.000	49.000	19.6	—	—	102300
	3.000	～	2.000	4.000	68.600	19.6	—	—	127800
	2.000	～	1.000	5.000	88.200	19.6	—	—	150800
	1.000	～	0.460	5.540	103.292	19.6	—	—	167400
埋戻土(水中)	0.460	～	0.000	6.000	111.022	20.7	10.6	—	175600
	0.000	～	-1.000	7.000	118.760	20.7	10.6	—	183600
	-1.000	～	-2.000	8.000	129.360	20.7	10.6	—	194200
	-2.000	～	-3.000	9.000	139.960	20.7	10.6	—	204600
	-3.000	～	-4.000	10.000	150.560	20.7	10.6	—	214700
	-4.000	～	-4.804	10.804	160.121	20.7	10.6	—	223600
岩盤 (第②速度層)	-4.804	～	-5.400	11.400	168.316	23.3	13.2	620	—
	-5.400	～	-6.000	12.000	176.210	23.3	13.2	620	—
岩盤 (第④速度層)	-6.000	～	-9.000	15.000	201.770	24.5	14.4	1520	—
	-9.000	～	-12.000	18.000	244.970	24.5	14.4	1520	—
	-12.000	～	-15.000	21.000	288.170	24.5	14.4	1520	—
	-15.000	～	-18.000	24.000	331.370	24.5	14.4	1520	—
	-18.000	～	-21.000	27.000	374.570	24.5	14.4	1520	—
	-21.000	～	-24.000	30.000	417.770	24.5	14.4	1520	—
	-24.000	～	-27.000	33.000	460.970	24.5	14.4	1520	—
	-27.000	～	-30.000	36.000	504.170	24.5	14.4	1520	—
	-30.000	～	-32.000	38.000	540.170	24.5	14.4	1520	—
岩盤 (第⑤速度層)	-32.000	～	-35.000	41.000	577.220	25.2	15.1	1900	—
	-35.000	～	-38.000	44.000	622.520	25.2	15.1	1900	—
	-38.000	～	-41.000	47.000	667.820	25.2	15.1	1900	—
	-41.000	～	-44.000	50.000	713.120	25.2	15.1	1900	—
	-44.000	～	-47.000	53.000	758.420	25.2	15.1	1900	—
	-47.000	～	-50.000	56.000	803.720	25.2	15.1	1900	—

※1 掘削ズリ：$G_0=749\sigma_v'^{0.66}$ (N/mm^2)



（e）基本物性（比較地点⑤）

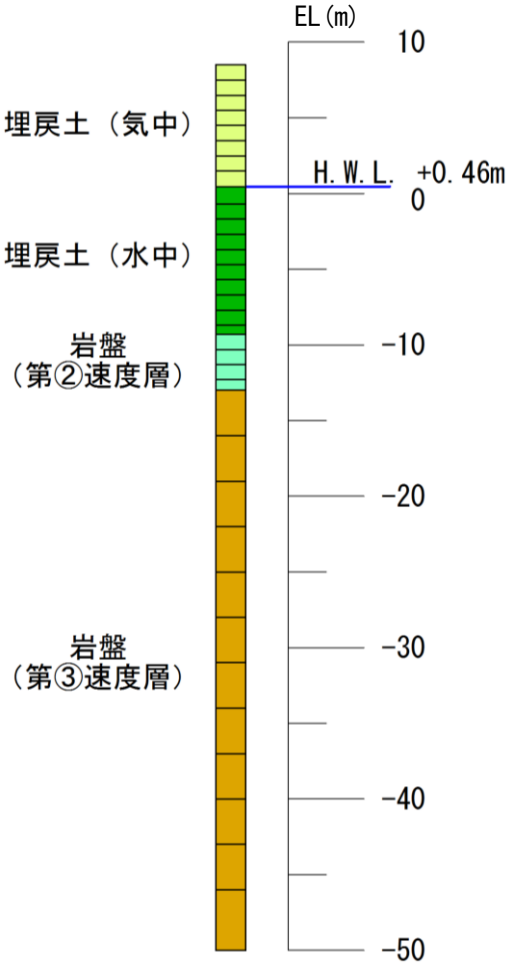
第3-3-5 図　解析用物性値及び解析モデル



地盤物性値

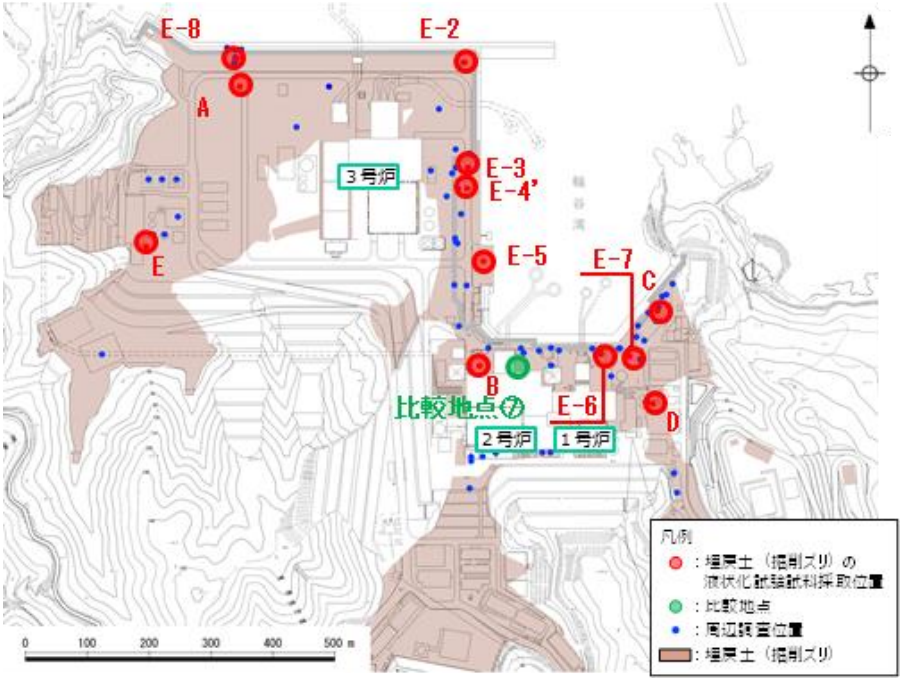
土層	標高 (EL m)	深度 (G.L.-m)	有効上載荷重 σ_v' (kN/m^2)	単位体積重量 飽和，湿潤 γ_{sat},γ_t (kN/m^3)	単位体積重量 水中 γ' (kN/m^3)	せん断波速度 V_s (m/s)	初期せん断弾性係数 G_0※1 (kN/m^2)
埋戻土(気中)	8.500 ～ 7.500	1.000	9.800	19.6	—	—	35370
	7.500 ～ 6.500	2.000	29.400	19.6	—	—	73050
	6.500 ～ 5.500	3.000	49.000	19.6	—	—	102300
	5.500 ～ 4.500	4.000	68.600	19.6	—	—	127800
	4.500 ～ 3.500	5.000	88.200	19.6	—	—	150800
	3.500 ～ 2.500	6.000	107.800	19.6	—	—	172200
	2.500 ～ 1.500	7.000	127.400	19.6	—	—	192300
	1.500 ～ 0.460	8.040	147.392	19.6	—	—	211700
埋戻土(水中)	0.460 ～ -0.700	9.200	163.732	20.7	10.6	—	226900
	-0.700 ～ -1.700	10.200	175.180	20.7	10.6	—	237200
	-1.700 ～ -2.700	11.200	185.780	20.7	10.6	—	246600
	-2.700 ～ -3.700	12.200	196.380	20.7	10.6	—	255800
	-3.700 ～ -4.700	13.200	206.980	20.7	10.6	—	264800
	-4.700 ～ -5.700	14.200	217.580	20.7	10.6	—	273700
	-5.700 ～ -6.700	15.200	228.180	20.7	10.6	—	282500
	-6.700 ～ -7.700	16.200	238.780	20.7	10.6	—	291000
	-7.700 ～ -8.700	17.200	249.380	20.7	10.6	—	299500
	-8.700 ～ -9.300	17.800	257.860	20.7	10.6	—	306200
岩盤 (第②速度層)	-9.300 ～ -10.300	18.800	267.490	23.0	12.9	900	—
	-10.300 ～ -11.300	19.800	280.390	23.0	12.9	900	—
	-11.300 ～ -12.300	20.800	293.290	23.0	12.9	900	—
	-12.300 ～ -13.000	21.500	304.255	23.0	12.9	900	—
岩盤 (第③速度層)	-13.000 ～ -16.000	24.500	330.370	24.5	14.4	1600	—
	-16.000 ～ -19.000	27.500	373.570	24.5	14.4	1600	—
	-19.000 ～ -22.000	30.500	416.770	24.5	14.4	1600	—
	-22.000 ～ -25.000	33.500	459.970	24.5	14.4	1600	—
	-25.000 ～ -28.000	36.500	503.170	24.5	14.4	1600	—
	-28.000 ～ -31.000	39.500	546.370	24.5	14.4	1600	—
	-31.000 ～ -34.000	42.500	589.570	24.5	14.4	1600	—
	-34.000 ～ -37.000	45.500	632.770	24.5	14.4	1600	—
	-37.000 ～ -40.000	48.500	675.970	24.5	14.4	1600	—
	-40.000 ～ -43.000	51.500	719.170	24.5	14.4	1600	—
	-43.000 ～ -46.000	54.500	762.370	24.5	14.4	1600	—
	-46.000 ～ -50.000	58.500	812.770	24.5	14.4	1600	—

※1 掘削ズリ：$G_0=749\sigma_v'^{0.66}$ (N/mm^2)



（f）基本物性（比較地点⑥）

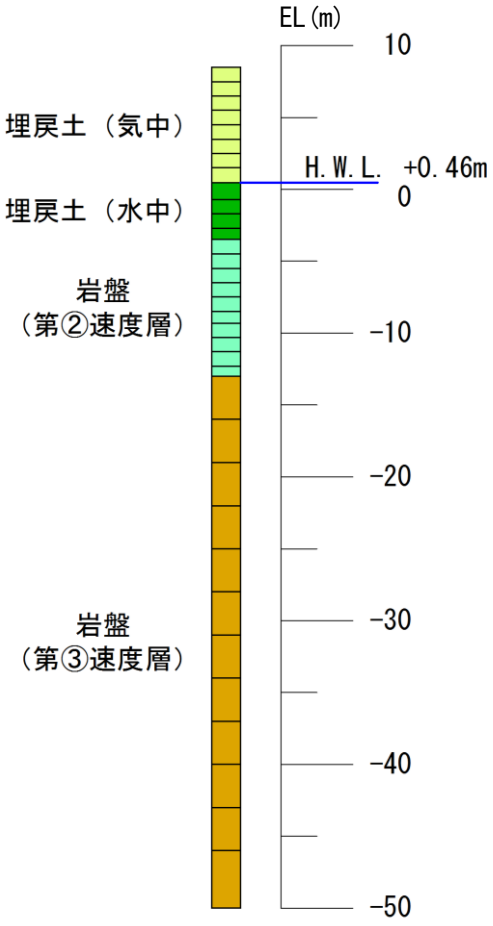
第3-3-5 図　解析用物性値及び解析モデル



地盤物性値

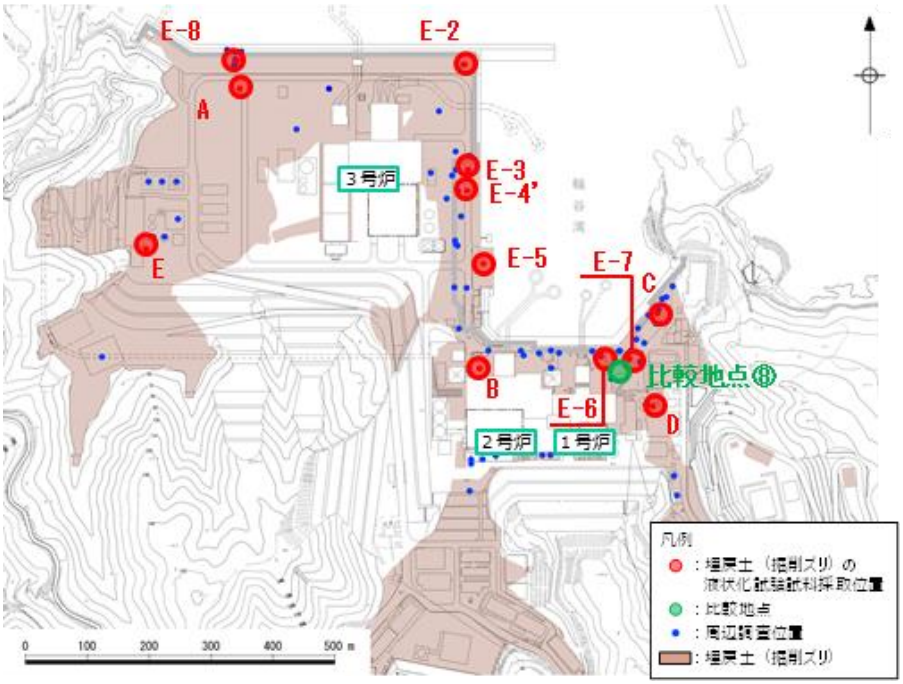
土層	標高 (EL m)	深度 (G.L.-m)	有効上載荷重 σ_v' (kN/m^2)	単位体積重量 飽和，湿潤 γ_{sat},γ_t (kN/m^3)	単位体積重量 水中 γ' (kN/m^3)	せん断波速度 V_s (m/s)	初期せん断弾性係数 G_0 ※1 (kN/m^2)
埋戻土(気中)	8.500 ～ 7.500	1.000	9.800	19.6	—	—	35370
	7.500 ～ 6.500	2.000	29.400	19.6	—	—	73050
	6.500 ～ 5.500	3.000	49.000	19.6	—	—	102300
	5.500 ～ 4.500	4.000	68.600	19.6	—	—	127800
	4.500 ～ 3.500	5.000	88.200	19.6	—	—	150800
	3.500 ～ 2.500	6.000	107.800	19.6	—	—	172200
	2.500 ～ 1.500	7.000	127.400	19.6	—	—	192300
	1.500 ～ 0.460	8.040	147.392	19.6	—	—	211700
埋戻土(水中)	0.460 ～ -0.700	9.200	163.732	20.7	10.6	—	226900
	-0.700 ～ -1.700	10.200	175.180	20.7	10.6	—	237200
	-1.700 ～ -2.700	11.200	185.780	20.7	10.6	—	246600
	-2.700 ～ -3.498	11.998	195.309	20.7	10.6	—	254900
岩盤 (第②速度層)	-3.498 ～ -4.500	13.000	206.002	23.0	12.9	900	—
	-4.500 ～ -5.500	14.000	218.915	23.0	12.9	900	—
	-5.500 ～ -6.500	15.000	231.815	23.0	12.9	900	—
	-6.500 ～ -7.500	16.000	244.715	23.0	12.9	900	—
	-7.500 ～ -8.500	17.000	257.615	23.0	12.9	900	—
	-8.500 ～ -9.300	17.800	269.225	23.0	12.9	900	—
	-9.300 ～ -10.300	18.800	280.835	23.0	12.9	900	—
	-10.300 ～ -11.300	19.800	293.735	23.0	12.9	900	—
	-11.300 ～ -12.300	20.800	306.635	23.0	12.9	900	—
	-12.300 ～ -13.000	21.500	317.600	23.0	12.9	900	—
岩盤 (第③速度層)	-13.000 ～ -16.000	24.500	343.715	24.5	14.4	1600	—
	-16.000 ～ -19.000	27.500	386.915	24.5	14.4	1600	—
	-19.000 ～ -22.000	30.500	430.115	24.5	14.4	1600	—
	-22.000 ～ -25.000	33.500	473.315	24.5	14.4	1600	—
	-25.000 ～ -28.000	36.500	516.515	24.5	14.4	1600	—
	-28.000 ～ -31.000	39.500	559.715	24.5	14.4	1600	—
	-31.000 ～ -34.000	42.500	602.915	24.5	14.4	1600	—
	-34.000 ～ -37.000	45.500	646.115	24.5	14.4	1600	—
	-37.000 ～ -40.000	48.500	689.315	24.5	14.4	1600	—
	-40.000 ～ -43.000	51.500	732.515	24.5	14.4	1600	—
	-43.000 ～ -46.000	54.500	775.715	24.5	14.4	1600	—
	-46.000 ～ -50.000	58.500	826.115	24.5	14.4	1600	—

※1 掘削ズリ：$G_0=749\sigma_v'^{0.66}$ (N/mm^2)



（g）基本物性（比較地点⑦）

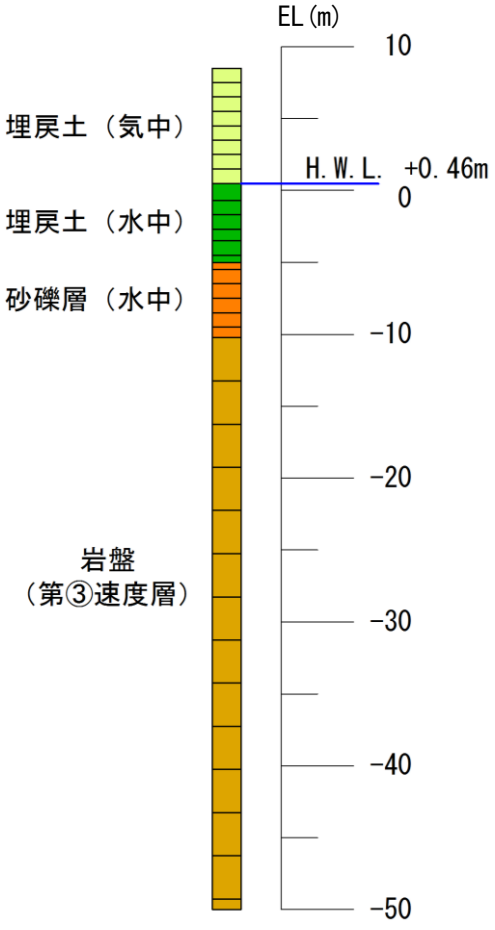
第3-3-5 図　解析用物性値及び解析モデル



地盤物性値

土層	標高 (EL m)		深度 (G.L.-m)	有効上載荷重 σ_v' (kN/m^2)	単位体積重量		せん断波速度 V_s (m/s)	初期せん断弾性係数 G_0※1 (kN/m^2)
					飽和，湿潤 γ_{sat}-γ_t (kN/m^3)	水中 γ' (kN/m^3)		
埋戻土(気中)	8.500	～ 7.500	1.000	9.800	19.6	—	—	35370
	7.500	～ 6.500	2.000	29.400	19.6	—	—	73050
	6.500	～ 5.500	3.000	49.000	19.6	—	—	102300
	5.500	～ 4.500	4.000	68.600	19.6	—	—	127800
	4.500	～ 3.500	5.000	88.200	19.6	—	—	150800
	3.500	～ 2.500	6.000	107.800	19.6	—	—	172200
	2.500	～ 1.500	7.000	127.400	19.6	—	—	192300
	1.500	～ 0.460	8.040	147.392	19.6	—	—	211700
埋戻土(水中)	0.460	～ -0.700	9.200	163.732	20.7	10.6	—	226900
	-0.700	～ -1.700	10.200	175.180	20.7	10.6	—	237200
	-1.700	～ -2.700	11.200	185.780	20.7	10.6	—	246600
	-2.700	～ -3.500	12.000	195.320	20.7	10.6	—	254900
	-3.500	～ -4.500	13.000	204.860	20.7	10.6	—	263100
	-4.500	～ -5.012	13.512	212.874	20.7	10.6	—	269800
砂礫層(水中)	-5.012	～ -5.500	14.000	218.174	20.7	10.6	—	94820
	-5.500	～ -6.500	15.000	226.060	20.7	10.6	—	96890
	-6.500	～ -7.500	16.000	236.660	20.7	10.6	—	99640
	-7.500	～ -8.500	17.000	247.260	20.7	10.6	—	102300
	-8.500	～ -9.500	18.000	257.860	20.7	10.6	—	105000
	-9.500	～ -10.249	18.749	267.130	20.7	10.6	—	107300
岩盤 (第③速度層)	-10.249	～ -13.249	21.749	292.699	24.5	14.4	1600	—
	-13.249	～ -16.249	24.749	335.899	24.5	14.4	1600	—
	-16.249	～ -19.249	27.749	379.099	24.5	14.4	1600	—
	-19.249	～ -22.249	30.749	422.299	24.5	14.4	1600	—
	-22.249	～ -25.249	33.749	465.499	24.5	14.4	1600	—
	-25.249	～ -28.249	36.749	508.699	24.5	14.4	1600	—
	-28.249	～ -31.249	39.749	551.899	24.5	14.4	1600	—
	-31.249	～ -34.249	42.749	595.099	24.5	14.4	1600	—
	-34.249	～ -37.249	45.749	638.299	24.5	14.4	1600	—
	-37.249	～ -40.249	48.749	681.499	24.5	14.4	1600	—
	-40.249	～ -43.249	51.749	724.699	24.5	14.4	1600	—
	-43.249	～ -46.249	54.749	767.899	24.5	14.4	1600	—
	-46.249	～ -49.249	57.749	811.099	24.5	14.4	1600	—
	-49.249	～ -50.000	58.500	838.107	24.5	14.4	1600	—

※1 掘削ズリ：$G_0=749\sigma_v'^{0.66}$ (N/mm^2)，砂礫：$G_0=240\sigma_v'^{0.61}$ (N/mm^2)



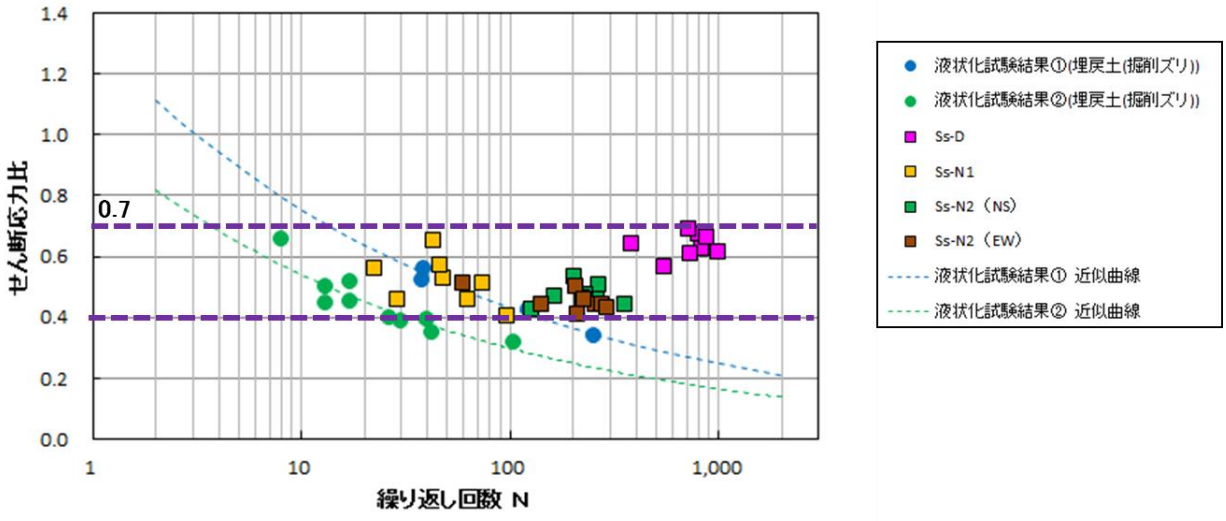
(h) 基本物性（比較地点⑧）

第3-3-5 図　解析用物性値及び解析モデル

第3-3-1 表　地震応答解析における最大せん断応力と等価繰返し回数（埋戻土（掘削ズリ））

基準地震動Ｓｓ	Ss-D		Ss-N1		Ss-N2(NS)		Ss-N2(EW)	
	L	N_{eq}	L	N_{eq}	L	N_{eq}	L	N_{eq}
比較地点①	0.67	801.1	0.51	73.2	0.51	266.5	0.44	256.1
比較地点②	0.69	713.1	0.53	48.1	0.53	202.6	0.44	278.3
比較地点③	0.63	834.0	0.40	96.9	0.46	260.8	0.43	290.9
比較地点④	0.64	384.5	0.46	28.7	0.47	164.1	0.44	142.7
比較地点⑤	0.66	879.2	0.65	42.9	0.47	230.9	0.50	205.4
比較地点⑥	0.61	728.6	0.46	62.7	0.46	223.4	0.41	210.9
比較地点⑦	0.62	998.0	0.57	45.9	0.44	356.9	0.46	225.7
比較地点⑧	0.57	544.4	0.56	22.4	0.42	127.2	0.51	59.4

最大せん断応力比：$L=\tau_e/\sigma_v'$
τ_e：等価せん断応力（$=0.65\times\tau_{max}$），
$\sigma v'$：有効土被り圧
N_{eq}：等価繰返し回数



第3-3-6 図　累積損傷度理論に基づく評価結果（埋戻土（掘削ズリ））

3.4　簡易設定法

港湾基準では，有効応力解析（ＦＬＩＰ）に使用する地盤の物性に関するパラメータの設定方法について，原位置で行われた詳細な土質データを用いて検討することを基本としているが，簡易設定法による方法も明記されている。

簡易設定法は，港湾基準に基づく詳細な計算例をまとめた設計事例集に準拠し，液状化強度比R_Lと相関が高いＮ値，有効上載圧及び細粒分含有率を用いて，有効応力解析（ＦＬＩＰ）の解析理論に則った液状化強度特性を設定することができる。

有効応力解析（ＦＬＩＰ）は，解析において土粒子と間隙水の両方を取り扱うことによって，過剰間隙水圧の上昇を模擬できるとともに，過剰間隙水圧の上昇に伴う土要素の剛性及び強度の低下，すなわち液状化現象を模擬することができる解析コードである。さらに，地盤の液状化に伴う構造物の変形等，地盤と構造物の相互作用を模擬することができる。

有効応力解析（ＦＬＩＰ）で用いる有効応力モデルのパラメータのうち，液状化特性（過剰間隙水圧の発生）を設定するパラメータを第3-4-1 表に示す。

第3-4-1 表　有効応力解析（ＦＬＩＰ）で用いる有効応力モデルの主なパラメータ

分類	モデルパラメータ	
液状化特性	Φ_p	変相角
	w_1	過剰間隙水圧上昇の全体を規定するパラメータ
	p_1	過剰間隙水圧上昇の前半を規定するパラメータ
	p_2	過剰間隙水圧上昇の後半を規定するパラメータ
	c_1	液状化強度の下限値を規定するパラメータ
	S_1	液状化の終局状態を規定するパラメータ

液状化特性を設定するパラメータは，繰返し非排水三軸試験結果を踏まえ，ＦＬＩＰで試行的な繰返し計算を行い，全てのせん断応力比における整合性を確認して設定する方法が標準的とされている。

一方，簡易設定法は標準的な液状化パラメータ設定法を基に，これらのパラメータを，通常の地盤調査で比較的入手しやすい標準貫入試験のＮ値等と関連付けて設定する方法である。

簡易設定法では，原位置のＮ値及び有効上載圧より求まる等価Ｎ値をもとに簡易的に求めた液状化強度曲線が，ＦＬＩＰを用いた繰返し三軸試験のシミュレーション結果に合うように求める。その液状化パラメータのうちp2については，以下の式で算出する。

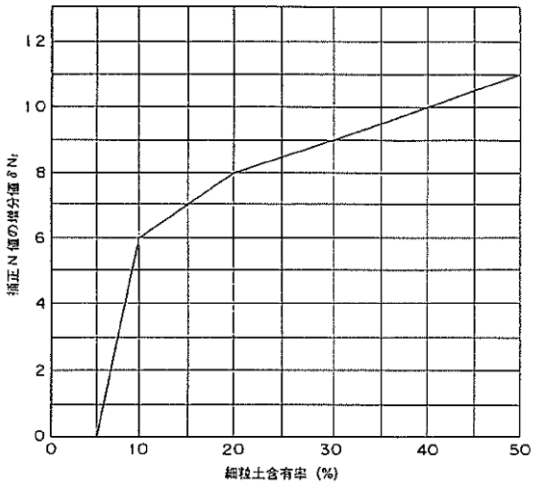
$$(N)_{0.66}=(N-1.828(\sigma_v'-0.66))/(0.399(\sigma_v'-0.66)+1)$$

$$N_a=(1/0.66)^{0.5}\times(N)_{0.66}+dNt$$ ※dNt は森田ら（1997）の右図から求める

ここに，$(N)_{0.66}$：等価Ｎ値

σ_v'：有効上載圧

$$p_2=-0.0166N_a+1.215$$

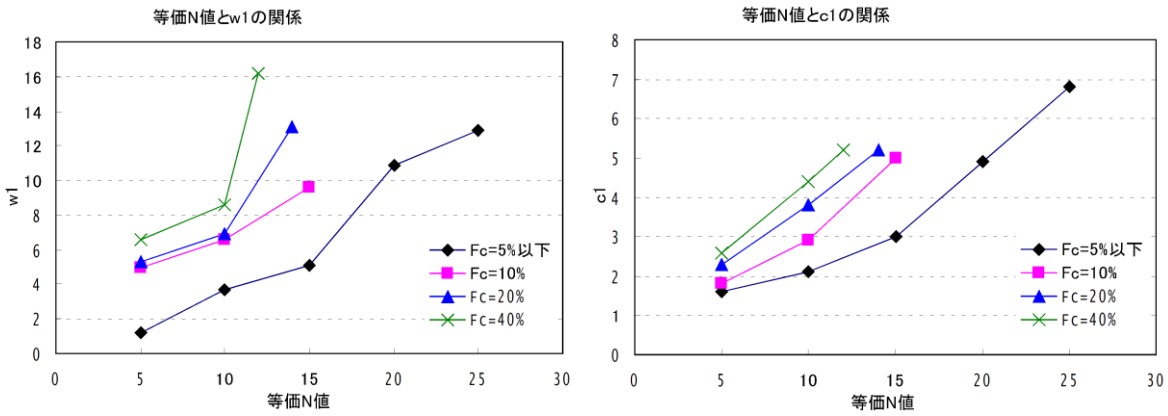


第3-4-1図　細粒分含有率に応じた補正Ｎ値の増分値

w1，c1については，最新の研究成果に基づき第3-4-2図から算出する。なお，変相角φp=28度， p1=0.5，s1=0.005については，「液状化による構造物被害予測プログラムＦＬＩＰにおいて必要な各種パラメタの簡易設定法（森田ら）」に基づき固定値とする。

今回，保守的に液状化強度特性を設定するため，標準貫入試験で求めたＮ値については，次頁のとおり取り扱う。

上述の方法等で求まる液状化パラメータに基づき，ＦＬＩＰにおいて各せん断応力比に対する繰返し回数を計算すると，第3-4-4～5図に示す簡易設定法に基づく液状化強度曲線が設定される。なお，敷地全体としての評価を行うことにより代表性・網羅性を確保する観点から，埋戻土（掘削ズリ）及び砂礫層のＮ値及び細粒分含有率については，敷地全体の平均値を用いる。



第 3-4-2 図　等価Ｎ値と液状化パラメータ w1 及び c1 の関係

標準貫入試験（JIS A 1219）※により得られたＮ値について，今回，以下のとおり扱うことにより，保守的に液状化強度特性を設定する。

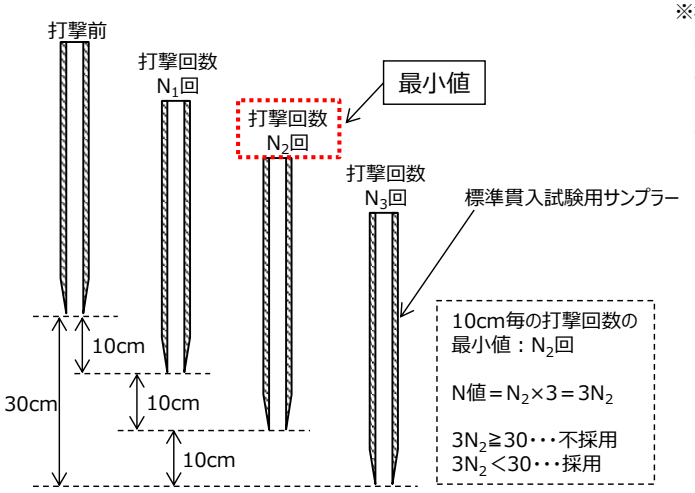
① Ｎ値=50以上：非常に密な地盤であるため，液状化強度特性の設定に使用しない。

② Ｎ値=30以上：密な地盤であるため，保守的に補正し，以下のとおり扱う。

・　10cm毎の打撃回数の最小値を３倍した値とし，その値が30以上の場合，結果を液状化強度特性の設定に使用しない。

・　10cm毎の打撃回数の最小値を３倍した値とし，その値が30未満の場合，結果を液状化強度特性の設定に使用する。

③Ｎ値=30未満：液状化強度特性の設定にそのまま使用する。



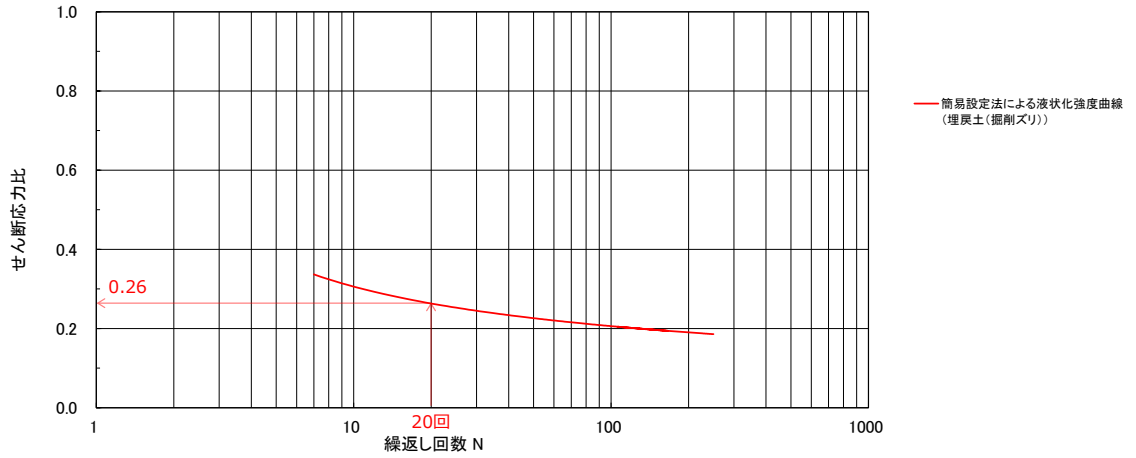
※標準貫入試験（JIS A 1219）は，標準貫入試験用サンプラーを動的貫入することによって原位置における地盤の硬軟，締まり具合又は土層の構成を判定するためのＮ値を得るために行う。試験は，質量 63.5kg のハンマーを 76cm の高さから自由落下させ，標準貫入試験用サンプラーを打ち込む。Ｎ値は，標準貫入試験用サンプラーを 30cm 打ち込むために必要な打撃回数である。

第 3-4-3 図　Ｎ値の評価概要図（②Ｎ値=30 以上）

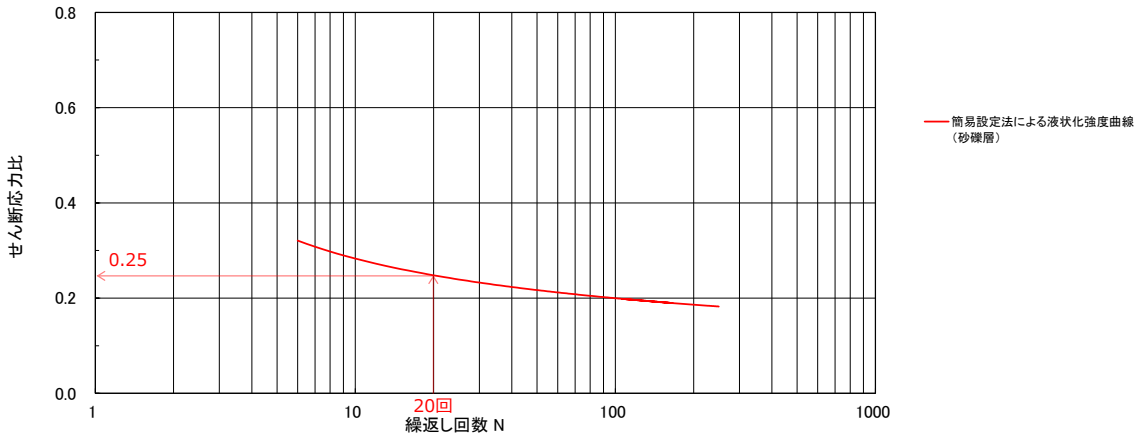
第 3-4-2 表　簡易設定法におけるＮ値の考え方

	打撃回数			N値 （JIS A 1219） （$N_1+N_2+N_3$）	N値（補正） （最小値の3倍）	評価結果 （今回）
	N_1	N_2	N_3			
①	50	-	-	50	-	使用しない
	17	33	-	50	-	使用しない
	17	11	22	50	-	使用しない
②	15	12	18	45	36	使用しない
	15	9	18	42	27	27
③	8	10	5	23	-	23

簡易設定法による液状化パラメータで計算した液状化強度曲線を第3-4-4～5図に示す。



3-4-4 図　埋戻土（掘削ズリ）の液状化強度曲線



第3-4-5 図　砂礫層の液状化強度曲線

・簡易設定法の適用範囲

「液状化による構造物被害予測プログラムＦＬＩＰにおいて必要な各種パラメタの簡易設定法（森田ら）」では，ＦＬＩＰを用いて解析を行う場合の種々のパラメータの設定方法として標準貫入試験のＮ値から簡易的に設定する方法が示されており，この検討で用いられているせん断応力比は，0.2～0.9程度（Fc=10～20%）と幅の広い値としている。

島根２号炉における埋戻土（掘削ズリ）の累積損傷度理論に基づく評価において，基準地震動Ｓｓでの最大せん断応力比は0.4～0.7程度である。

島根２号炉における埋戻土（掘削ズリ）の最大せん断応力比は，森田らの検討で使用されているせん断応力比に包含されていることから，簡易設定法が適用できると考えられる。

表－６　等価Ｎ値$(N)_{0.66}$に対するせん断応力比τ_1/σ_m'（細粒分含有率$F_c \geqq 10\%$の場合）

(a) F_c＝10％の場合

$(N)_{0.66}$	N_a	10回	15回	26回
				最小
5	12	0.24	0.22	0.21
10	18	0.35	0.31	0.28
15	24	0.69	0.54	0.43

(b) F_c＝20％の場合

$(N)_{0.66}$	N_a	10回	15回	26回
5	14	0.26	0.24	0.22
10	20	0.41	0.36	0.32
14	25	0.85	0.66	0.51
		最大		

液状化による構造物被害予測プログラムＦＬＩＰにおいて必要な各種パラメタの簡易設定法（森田ら）より引用

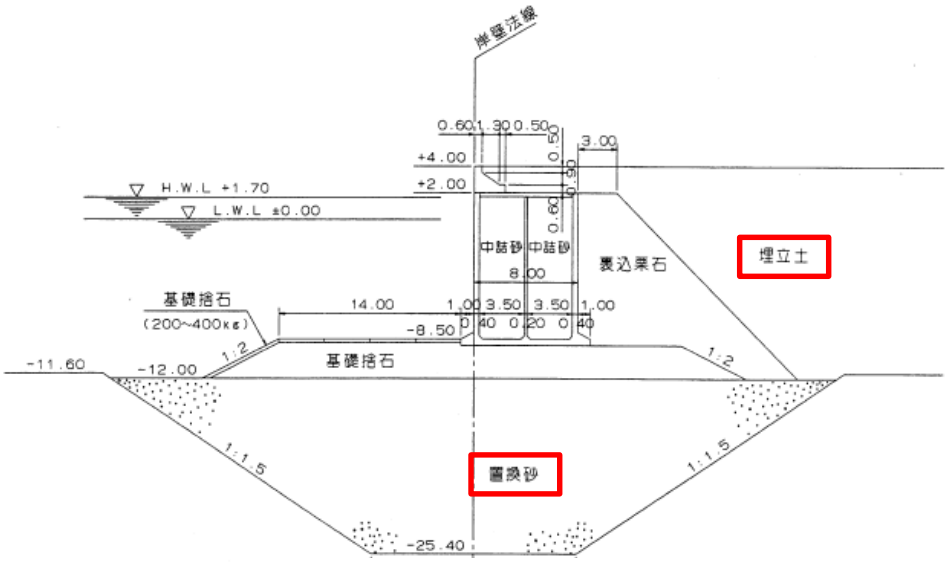
第3-4-6 図　簡易設定法の根拠資料

・簡易設定法の実績

「液状化解析プログラムＦＬＩＰによる動的解析の実務（財団法人沿岸技術研究センター）」では，兵庫県南部地震における神戸RF３岸壁及び神戸港Ｔ桟橋の被災状況に対して，簡易設定法により液状化パラメータを設定した再現解析にて検証を行った実績が示されている。

「神戸RF３岸壁」は重力式構造物を，「神戸港Ｔ桟橋」は杭式構造物を対象としており，「神戸RF３岸壁」においては，埋立土及び置換砂の液状化パラメータを簡易設定法で設定し，概ね被災状況を再現できている。

以上の実績を踏まえ，島根２号炉における防波壁等に対する液状化影響評価において簡易設定法が適用できると判断した。



第3-4-7 図　神戸RF３岸壁　標準断面図

第3-4-3 表　液状化パラメータの簡易設定法の実績

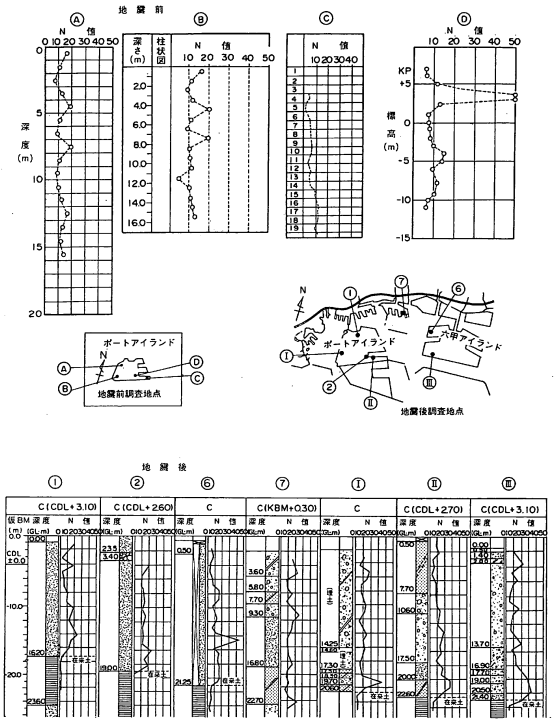
地震名	対象施設	被災状況	再現解析
平成7年 兵庫県南部 地震	神戸 RF3岸壁	水平変位 3.7m	水平変位 3.09m
	神戸港 T桟橋	水平変位 1.4～1.5m	水平変位 2.01m

液状化解析プログラムＦＬＩＰによる動的解析の実務（財団法人沿岸技術研究センター）より引用

Ｎ値及び粒径加積曲線について，島根２号炉の埋戻土（掘削ズリ）及び砂礫層と，神戸港の埋立土との比較を第3-4-8 図に示す。

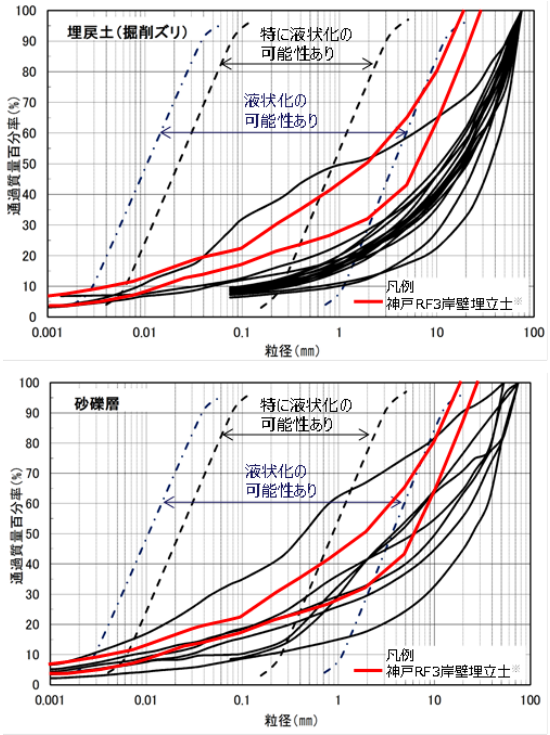
神戸港の埋立土のＮ値は，いずれも５～10前後，最大20程度を示しており，島根２号炉と同程度である。神戸港の埋立土の粒径は，島根２号炉の埋戻土（掘削ズリ）より小さく，砂礫層と同程度であるが，両者とも粒径が広い範囲にわたって分布し，礫を含む土層である。

以上より，簡易設定法により液状化パラメータを設定した再現解析にて検証を行った実績のある神戸港の埋立土に対し，島根２号炉の埋戻土（掘削ズリ）及び砂礫層の土質性状は類似していることから，簡易設定法の適用は妥当であると判断した。



神戸港の埋立土のＮ値

兵庫県南部地震による港湾施設の被害考察（運輸省港湾技術研究所，港湾技研資料）より引用



粒径加積曲線の比較

※兵庫県南部地震による港湾施設の被害考察（運輸省港湾技術研究所，港湾技研資料）より引用

第 3-4-8 図　島根２号炉の埋戻土（掘削ズリ）及び砂礫層と神戸港埋立土の比較

3.5 液状化強度特性の設定方針

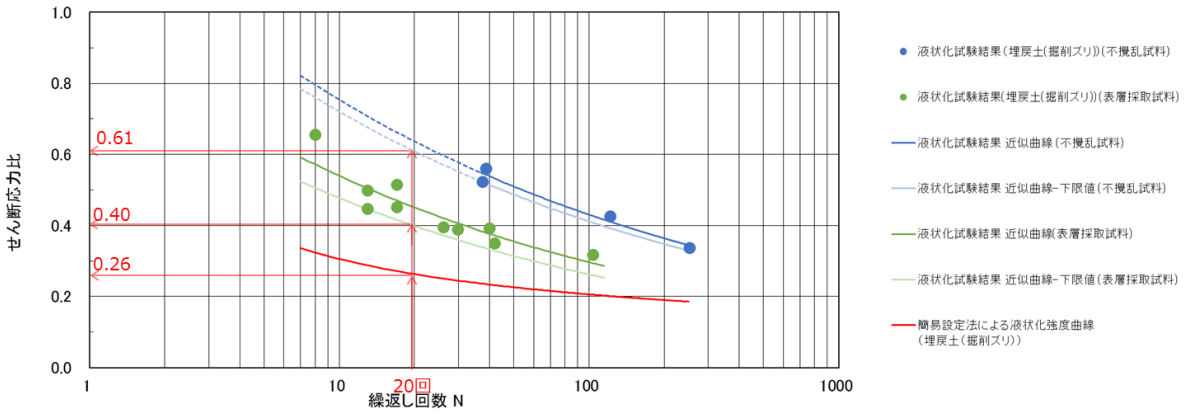
液状化試験結果より，液状化を示す土層はないが，繰返し軟化（サイクリックモビリティ含む），若しくは非液状化となる土層（埋戻土（掘削ズリ），砂礫層）については，念のため液状化強度特性を設定し，保守的に構造物への影響評価を実施する。

各土層での液状化強度特性は，液状化試験を踏まえ，港湾基準に基づく詳細な計算例をまとめた設計事例集に準拠し，有効応力解析（ＦＬＩＰ）の簡易設定法により設定する。簡易設定法は，液状化強度比R_Lと相関が高いＮ値，有効上載圧及び細粒分含有率を用いて有効応力解析（ＦＬＩＰ）の解析理論に則った液状化強度特性を設定することができる。なお，簡易設定法で用いるＮ値は保守的な設定値（Ｎ値が30以上の場合は，10cm毎の打撃回数の最小値を３倍した値とし，その値が30以上の場合は不採用とする）とする。

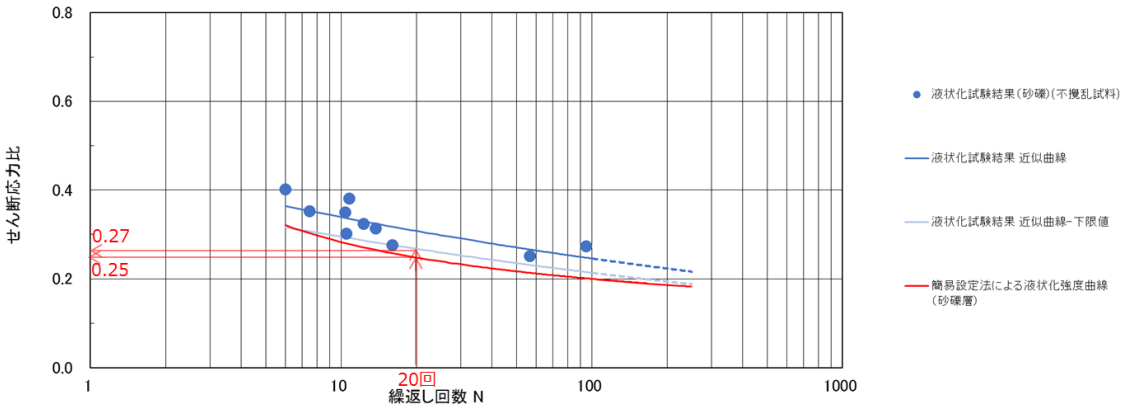
また，簡易設定法により設定された液状化強度特性は，液状化試験結果下限値の液状化強度特性よりも保守的であることを確認する。

第3-5-1 図に簡易設定法による液状化強度曲線と液状化試験結果による液状化強度曲線を示す。

簡易設定法により設定した液状化強度曲線（埋戻土（掘削ズリ））は，液状化試験結果①（ロータリー式三重管サンプラー）及び液状化試験結果②（表層試料採取）による液状化強度曲線の下側に位置する。そのため，簡易設定法による液状化強度比R_L（0.26）は，液状化試験①（ロータリー式三重管サンプラー）による液状化強度比R_L（0.61）及び液状化試験結果②（表層試料採取）による液状化強度比R_L（0.40）を下回り，保守的であることを確認した。また，簡易設定法により設定した液状化強度曲線（砂礫層）は液状化試験結果による液状化強度曲線の下側に位置し，簡易設定法による液状化強度比R_L（0.25）は液状化試験による液状化強度比R_L（0.27）を下回り，保守的であることを確認した。



(a) 埋戻土（掘削ズリ）



(b) 砂礫層

第3-5-1 図　簡易設定法及び液状化試験結果による液状化強度曲線の比較

4.　液状化影響の評価方針

4.1 液状化影響の検討方針

液状化評価については道路橋示方書を基本として，道路橋示方書において液状化評価の対象となっている砂礫層に加えて，液状化評価の対象外となっている埋戻土（掘削ズリ）についても液状化試験を実施し，液状化の有無を確認することで保守的な評価を実施した。液状化試験に基づいて，地震時の地盤の状態を『繰返し軟化（サイクリックモビリティ含む)』，若しくは『非液状化』と判定した。それぞれの試験結果及び，港湾基準に基づく詳細な計算例をまとめた設計事例集に準拠した有効応力解析（ＦＬＩＰ）の簡易設定法を踏まえ，液状化強度特性を設定し，構造物への影響評価を実施する。なお，試験結果が『非液状化』となる土層も，念のため液状化強度特性を設定して保守的な構造物評価を実施する。

液状化強度特性については，簡易設定法により設定するが，これにより設定される液状化強度特性が，液状化試験結果下限値の液状化強度特性よりも保守的であることを確認している。また，簡易設定法で用いるＮ値は保守的な設定値としている。

以上を踏まえ，有効応力解析（ＦＬＩＰ）の実施に当たっては，簡易設定法に基づき設定した液状化強度特性を適用する。

構造物の影響評価については，液状化に伴う影響を考慮するため，有効応力解析を実施する。有効応力解析においては，解析コード「ＦＬＩＰ」等を用いる。液状化試験結果に比べて保守的な簡易設定法により有効応力解析の液状化パラメータを設定し，構造物の影響評価を実施する。解析コード「ＦＬＩＰ」については，Iai et.al(1992) 及びIai et.al(1995)において，液状化及びサイクリックモビリティを示す地層についての適用性が検証されている。Iai et.al(1992)においては，サイクリックモビリティが観察された砂の繰返しねじり試験結果に対して，解析コード「ＦＬＩＰ」を用いた解析を実施し，解析結果が室内試験結果と良い対応を示したと報告している。Iai et.al(1995)においては，解析コード「ＦＬＩＰ」を用いて，1993 年釧路沖地震の再現解析を実施している。1993 年釧路沖地震の観測波はサイクリックモビリティの影響を示すスパイク状の地震波となっており，解析コード「ＦＬＩＰ」において地震観測値の密な地盤の液状化パラメータを設定することで，サイクリックモビリティの影響を示す観測値を再現することができたと報告している。よって，設置許可段階における構造物評価の見通しについては，解析コード「ＦＬＩＰ」を用いることとした。

なお，工事認可段階における構造物評価に当たっては，今回説明した液状化強度特性の妥当性及び採用した解析コードの適用性について，設計事例集で兵庫県南部地震における港湾施設の被災状況の再現性を検証することで確認されている。

第4-1-1 表 液状化評価の基本方針

本検討の対象土層				道路橋示方書及び港湾基準における液状化評価の対象	当社評価		
地層名		堆積年代	調査地点名 土層名		液状化試験による判定	液状化強度特性の設定の考え方	液状化強度特性の保守性
被覆層	盛土	完新世	E-2～E-8，A～E 埋戻土 (掘削ｽﾞﾘ)	× 対象外	「非液状化」 若しくは 「繰返し軟化(ｻｲｸﾘｯｸﾓﾋﾞﾘﾃｨ含む)」	設計事例集に準拠し，FLIPの簡易設定法に基づき設定する。	簡易設定法に基づき設定した液状化強度特性が，液状化試験結果による液状化強度特性と比べ保守的であることを確認する。
	崖錐・海底堆積物	完新世	E-1,E-7,E-8 砂礫層	○ 対象	「繰返し軟化(ｻｲｸﾘｯｸﾓﾋﾞﾘﾃｨ含む)」		

4.2 液状化検討対象施設の選定

設計基準対象施設及び重大事故等対処施設の設置状況を考慮し，液状化の影響を検討する必要がある液状化検討対象候補施設を抽出する。抽出に当たっては，設計基準対象施設（建物,構築物，屋外重要土木構造物及び津波防護施設）及び重大事故等対処施設を対象に検討する。なお，海中や岩盤上に設置される取水口及び取水管については，周囲に液状化評価対象層が分布しないことから，抽出対象外とする。

液状化検討対象候補施設の一覧を第4-2-1 表に，液状化検討対象候補施設，可搬型重大事故等対処設備保管場所及びアクセスルートの配置図を第4-2-1 図に示す。また，液状化検討対象候補施設について，液状化検討対象施設の選定及び解析手法選定フローを第4-2-2 図に示す。

詳細設計段階で設定する設計地下水位に対する液状化検討対象施設の選定等に当たって，第4-2-3 図に示す地下水位低下設備が機能しない状態が継続した場合の定常的な地下水位分布を予測した浸透流解析の結果を使用する。なお，原子炉建物等の建物,構築物については，地下水位低下設備の機能に期待した浸透流解析の結果を使用する。

地下水位の設定方針において，自然水位（地下水位低下設備を考慮しない場合の地下水位）より保守的に設定した水位とする施設については，以下に示す浸透流解析の結果を踏まえ，液状化検討対象施設の選定フローのうち「②施設周辺の地下水位が十分に低い」の判定を行う。

なお，可搬型重大事故等対処設備による重大事故等への対応に必要なアクセスルートは，地震時の液状化に伴う地中埋設構造物の浮き上がりの影響を受けることなく通行性を確保する設計とする。

ここでは，液状化検討対象施設の選定の考え方を示し，詳細設計段階において，設定した設計地下水位に基づき液状化検討対象施設の選定を行う。

4.2.1 液状化検討対象施設の選定及び解析手法選定の観点

液状化検討対象施設の選定及び解析手法選定における観点を以下に示す。

(1) 液状化検討対象施設の選定

液状化検討対象施設は以下の項目で抽出する。

①施設が岩盤中に設置されているか

②施設周辺の地下水位が十分に低いか

観点例：周辺地盤における地下水位が施設底版より低い。

(2) 液状化検討対象施設の解析手法の選定

a. 液状化検討対象施設（建物,構築物）

上記（1）にて選定された施設について，液状化等により施設に悪影響を与える恐れがある場合は，地盤の液状化等の影響を考慮した評価を行う（③）。

また，対象施設が機器・配管系の間接支持構造物である場合は，床応答の観点も考慮して解析手法を選定するものとする。

b．液状化検討対象施設（建物,構築物を除く）

上記（1）にて選定された施設について，施設周辺に改良地盤，マンメイドロック（MMR）及び他構造物（以下,「改良地盤等」という。）があり，液状化又は繰返し軟化（サイクリックモビリティ含む）※の影響を緩和している場合，その改良地盤等周辺の地盤の液状化又は繰返し軟化(サイクリックモビリティ含む)により施設に悪影響を与える恐れがあるか判断する。

③施設周辺に改良地盤等があり，液状化又は繰返し軟化（サイクリックモビリティ含む）の影響を緩和しているか

④改良地盤等周辺の地盤の液状化又は繰返し軟化(サイクリックモビリティ含む）により施設に悪影響を与える恐れがあるか

観点例：施設が改良地盤等に囲まれており，液状化等の影響がない。
施設周辺の地形等から，側方流動の影響がない。

③で施設周辺に改良地盤等がない場合,又は④で悪影響を与える恐れがある場合は,液状化考慮と液状化非考慮で耐震安全性評価上どちらが保守的になるかを確認するため,一次元又は二次元の全応力及び有効応力による地震応答解析を実施したうえで,全応力解析と有効応力解析それぞれの結果から構造物上下端の層間変位を比較するなどして，保守的となる解析手法を選定する（⑤)。

なお，地盤改良が必要となった場合は，上記で選定した解析手法により，その範囲の妥当性を確認する。

また，対象施設が機器・配管系の間接支持構造物である場合は，床応答の観点も考慮して解析手法を選定するものとする。

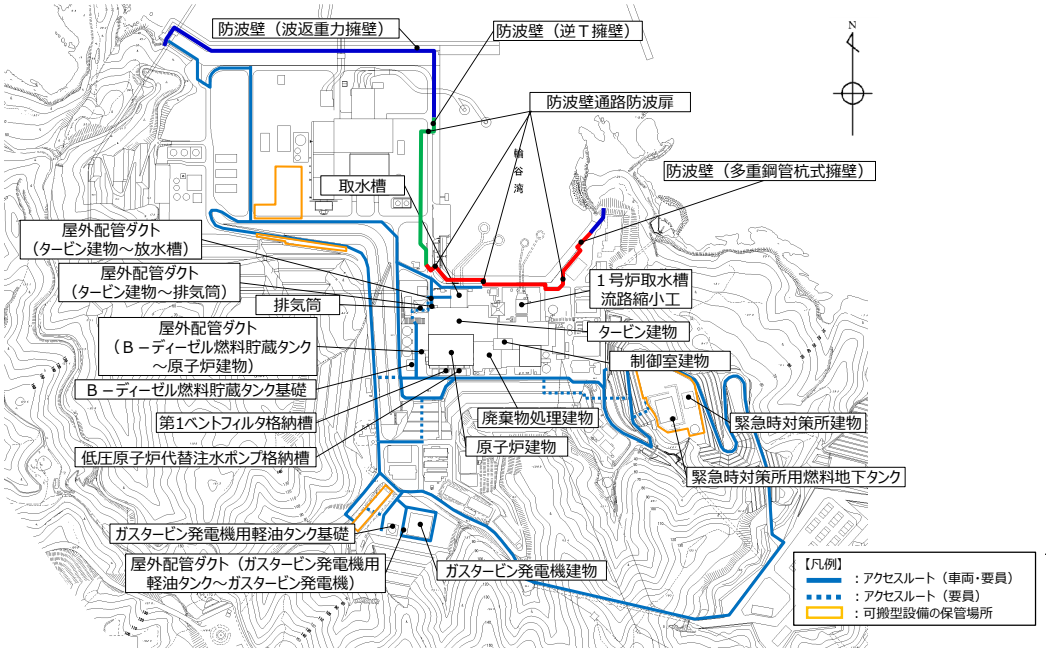
以上を踏まえ，詳細設計段階で設定する設計地下水位に対する液状化検討対象施設の選定及び解析手法選定の考え方を確認する目的で，液状化検討対象施設を選定した結果（例）を第4-2-2 表に，選定した液状化検討対象施設（例）に対し，設計基準対象施設・重大事故等対処施設の解析手法について検討した結果（例）を第4-2-3 表に，各施設の設置状況を第4-2-4 図～第4-2-15 図に示す。なお，詳細設計段階で実施する浸透流解析の結果を踏まえ，改めて液状化検討対象施設の選定及び選定解析手法の選定を行う。

※液状化と繰返し軟化（サイクリックモビリティ含む）の区分については「３．液状化強度特性の網羅性，代表性」にて説明。

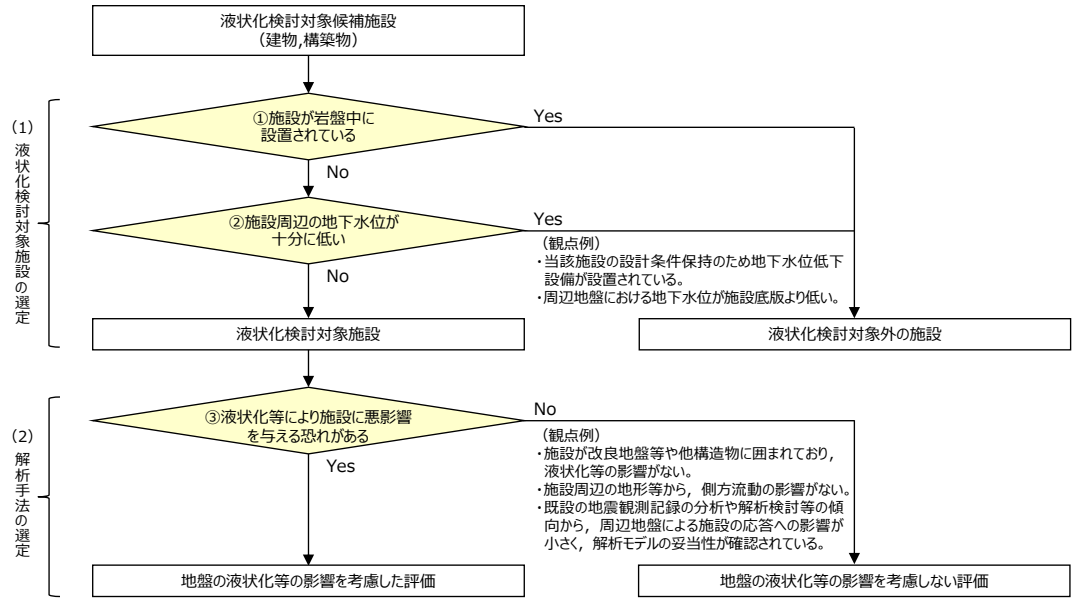
第4-2-1 表　液状化検討対象候補施設　一覧

施設分類		施設名称	基礎形式	支持層	基礎下端高さ※1 (EL　m)	地下水位の設定方針
設計基準対象施設	建物，構築物	原子炉建物	直接基礎	岩盤	－4.7	地下水位低下設備の機能に期待して，設計地下水位を設定する
		タービン建物	直接基礎	岩盤	0.0	
		廃棄物処理建物	直接基礎	岩盤	0.0	
		制御室建物	直接基礎	岩盤	+0.1	
		排気筒	直接基礎	岩盤	+2.0	
	屋外重要土木構造物	取水槽	直接基礎	岩盤	－11.7	自然水位※2より保守的に設定した水位
		屋外配管ダクト（タービン建物～排気筒）	直接基礎	岩盤	+4.9	
		屋外配管ダクト（タービン建物～放水槽）	直接基礎	岩盤	+1.0	
		Ｂ－ディーゼル燃料貯蔵タンク基礎	直接基礎	岩盤	+8.35	
		屋外配管ダクト（Ｂ－ディーゼル燃料貯蔵タンク～原子炉建物）	直接基礎	岩盤	+10.4	
	津波防護施設	防波壁（多重鋼管杭式擁壁）	杭基礎	岩盤	－19.1	
		防波壁（逆Ｔ擁壁）	杭基礎	岩盤	－10.65	
		防波壁（波返重力擁壁）	直接基礎	岩盤・改良地盤	－13.0	
		１号炉取水槽流路縮小工	直接基礎	岩盤	－7.1	
		防波壁通路防波扉	杭基礎	岩盤	-15.9	
重大事故等対処施設		第１ベントフィルタ格納槽	直接基礎	岩盤	+0.7	
		低圧原子炉代替注水ポンプ格納槽	直接基礎	岩盤	－1.3	
		緊急時対策所建物※3	直接基礎	岩盤	+48.25	
		緊急時対策所用燃料地下タンク	直接基礎	岩盤	+46.6	
		ガスタービン発電機建物※3	直接基礎	岩盤	+44.0	
		ガスタービン発電機用軽油タンク基礎	直接基礎	岩盤	+45.8	
		屋外配管ﾀﾞｸﾄ（ｶﾞｽﾀｰﾋﾞﾝ発電機用軽油ﾀﾝｸ～ｶﾞｽﾀｰﾋﾞﾝ発電機）	直接基礎	岩盤	+45.45	

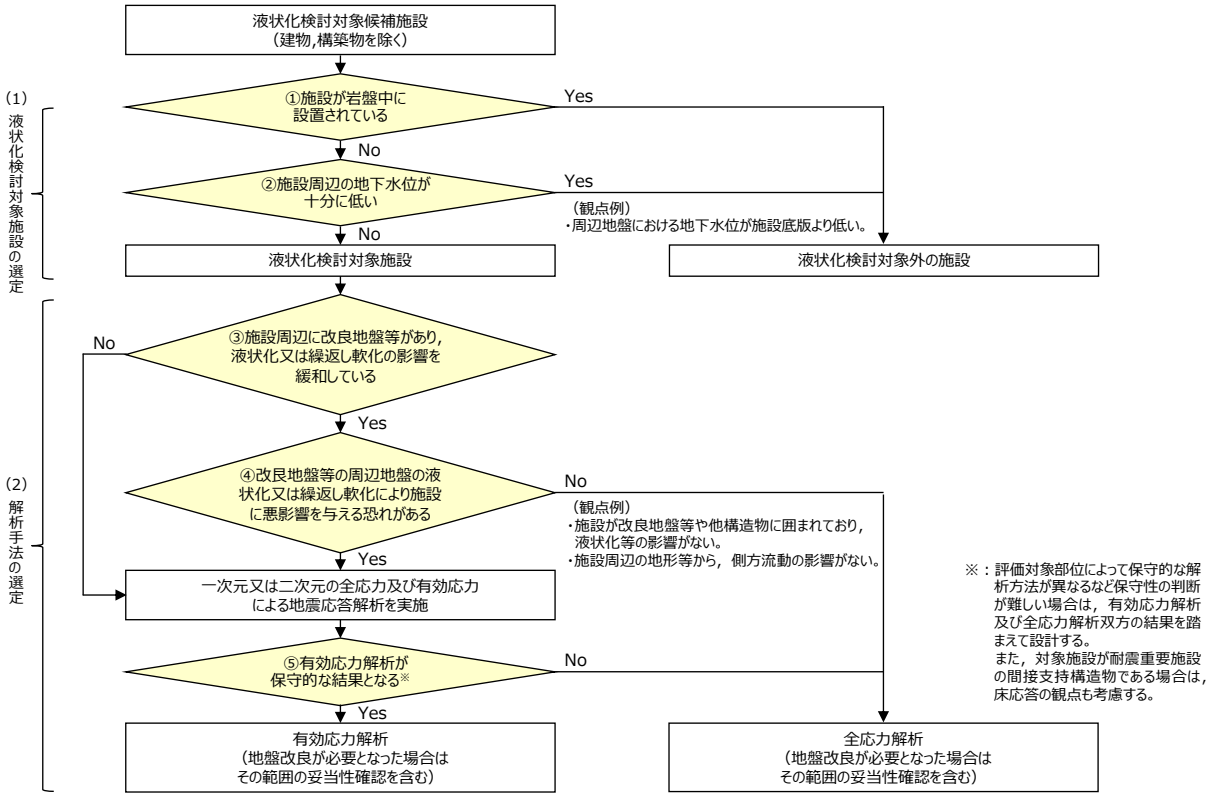
※1 各施設の代表的な基礎下端高さを示す。 ※2 地下水位低下設備を考慮しない場合の地下水位　※3 重大事故等対処施設のうち建物,構築物



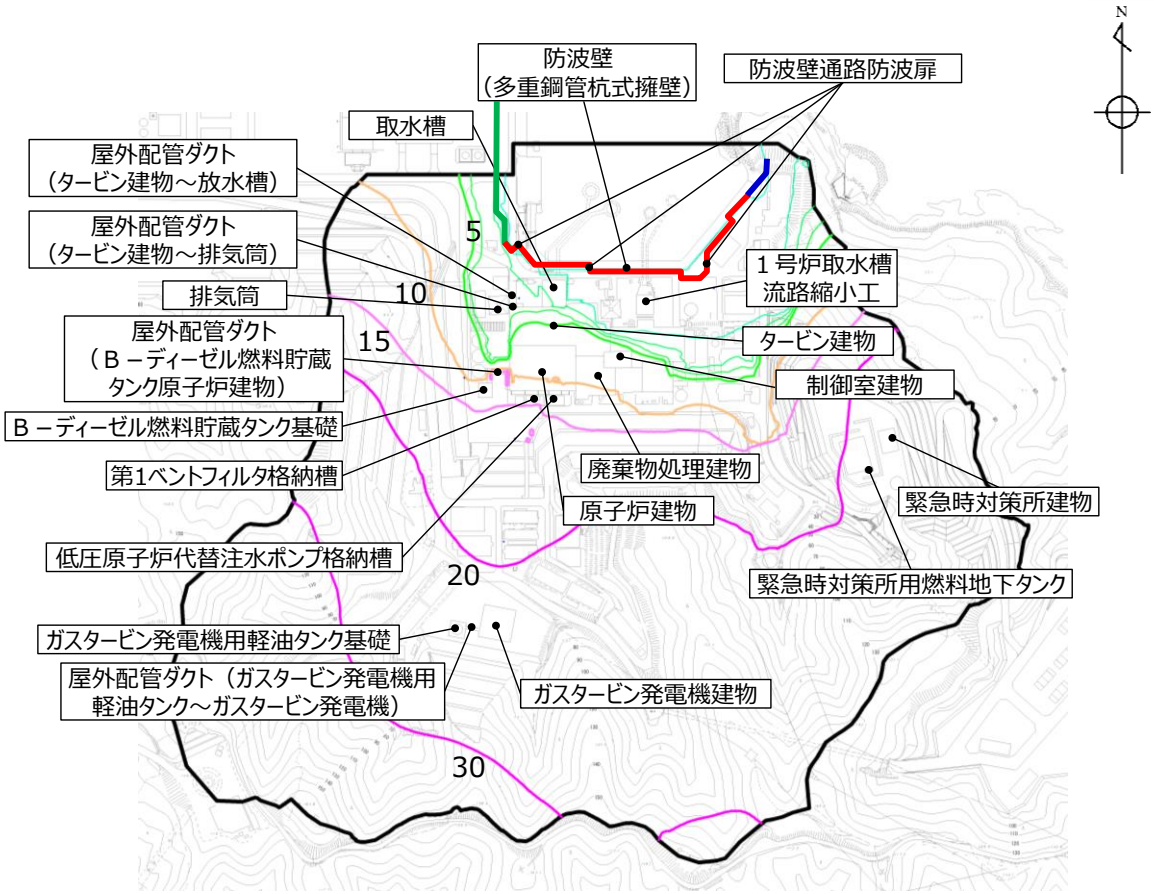
第4-2-1 図　液状化検討対象候補施設，可搬型重大事故等対処設備保管場所及びアクセスルート　配置図



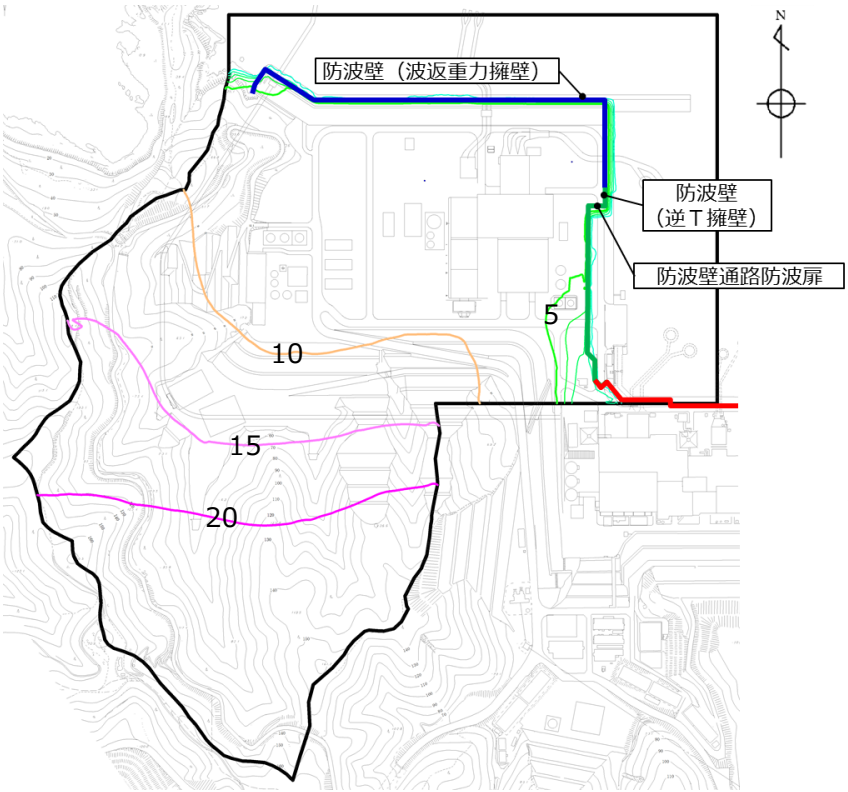
第4-2-2 図(1)　液状化検討対象施設の選定及び解析手法選定フロー
（建物,構築物）



第4-2-2 図(2)　液状化検討対象施設の選定及び解析手法選定フロー
（建物,構築物を除く）



1，２号炉エリア



３号炉エリア

第4-2-3 図　地下水位低下設備が機能しない場合の地下水位分布算定結果（例）

第4-2-2 表　液状化検討対象施設の選定結果（例）

施設分類		施設名称	項目			液状化検討対象施設※ ○：対象 ×：対象外
			①施設が岩盤中に設置されている	②施設周辺の地下水位が十分に低い		
設計基準対象施設	建物，構築物	原子炉建物	No	Yes	設計条件保持のため地下水位低下設備を設置することから，施設周辺の地下水位が十分に低い。	×
		タービン建物	No	Yes	設計条件保持のため地下水位低下設備を設置することから，施設周辺の地下水位が十分に低い。	×
		廃棄物処理建物	No	Yes	設計条件保持のため地下水位低下設備を設置することから，施設周辺の地下水位が十分に低い。	×
		制御室建物	No	Yes	設計条件保持のため地下水位低下設備を設置することから，施設周辺の地下水位が十分に低い。	×
		排気筒	No	Yes	設計条件保持のため地下水位低下設備を設置することから，施設周辺の地下水位が十分に低い。	×
	屋外重要土木構造物	取水槽	No	No	施設に接する高さに地下水位を設定する。	○
		屋外配管ダクト（タービン建物～排気筒）	No	No	施設に接する高さに地下水位を設定する。	○
		屋外配管ダクト（タービン建物～放水槽）	No	No	施設に接する高さに地下水位を設定する。	○
		Ｂ－ディーゼル燃料貯蔵タンク基礎	No	No	施設に接する高さに地下水位を設定する。	○
		屋外配管ダクト（Ｂ－ディーゼル燃料貯蔵タンク～原子炉建物）	No	No	施設に接する高さに地下水位を設定する。	○
	津波防護施設	防波壁（多重鋼管杭式擁壁）	No	No	施設に接する高さに地下水位を設定する。	○
		防波壁（逆Ｔ擁壁）	No	No	施設に接する高さに地下水位を設定する。	○
		防波壁（波返重力擁壁）	No	No	施設に接する高さに地下水位を設定する。	○
		１号炉取水槽流路縮小工	No	No	施設に接する高さに地下水位を設定する。	○
		防波壁通路防波扉	No	No	施設に接する高さに地下水位を設定する。	○
重大事故等対処施設		第１ベントフィルタ格納槽	No	No	施設に接する高さに地下水位を設定する。	○
		低圧原子炉代替注水ポンプ格納槽	No	No	施設に接する高さに地下水位を設定する。	○
		緊急時対策所建物	No	Yes	周辺地盤における地下水位が施設底版より低い。	×
		緊急時対策所用燃料地下タンク	No	Yes	周辺地盤における地下水位が施設底版より低い。	×
		ガスタービン発電機建物	No	Yes	周辺地盤における地下水位が施設底版より低い。	×
		ガスタービン発電機用軽油タンク基礎	No	Yes	周辺地盤における地下水位が施設底版より低い。	×
		屋外配管ﾀﾞｸﾄ（ｶﾞｽﾀｰﾋﾞﾝ発電機用軽油ﾀﾝｸ～ｶﾞｽﾀｰﾋﾞﾝ発電機）	No	Yes	周辺地盤における地下水位が施設底版より低い。	×

※　詳細設計段階で実施する浸透流解析の結果を踏まえ，改めて液状化検討対象施設の選定を行う。

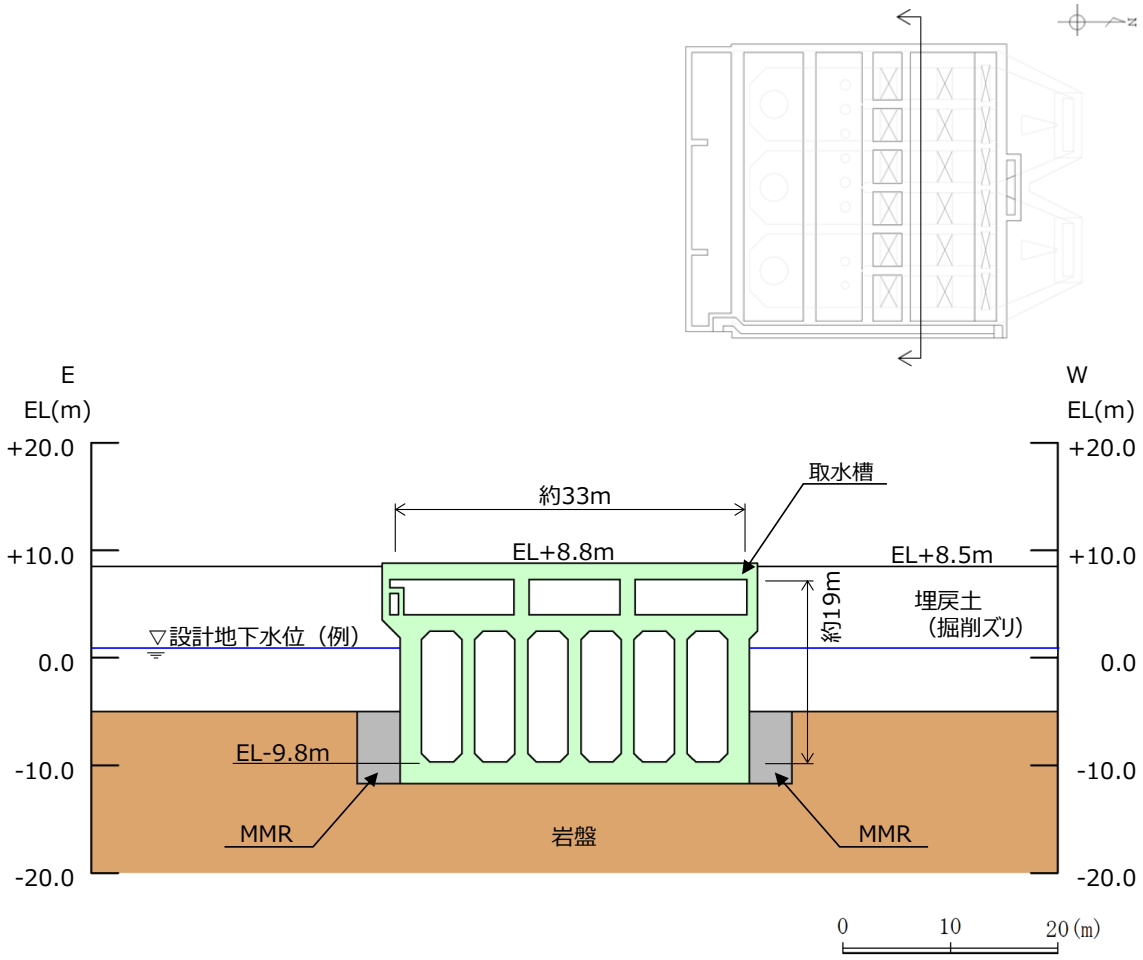
第4-2-3 表　液状化検討対象施設の解析手法選定結果（例）

施設分類		施設名称	項目			一次元又は二次元の全応力及び有効応力による地震応答解析を実施し，解析手法を選定※ ○：対象 ×：対象外
			③施設周辺に改良地盤等がある	④改良地盤等の周辺地盤の液状化又は繰返し軟化により施設に悪影響を与える恐れがある		
設計基準対象施設	屋外重要土木構造物	取水槽	No	－		○
		屋外配管ダクト（タービン建物～排気筒）	No	－		○
		屋外配管ダクト（タービン建物～放水槽）	No	－		○
		Ｂ－ディーゼル燃料貯蔵タンク基礎	Yes	No	施設が改良地盤等に囲まれ，その外側に液状化検討対象層がないことから，液状化の影響はない。	×
		屋外配管ダクト（Ｂ－ディーゼル燃料貯蔵タンク～原子炉建物）	Yes	Yes	施設側方に改良地盤等があるが，液状化検討対象層とも接している。また，改良地盤等の外側の液状化検討対象層の影響を無視できない。	○
	津波防護施設	防波壁（多重鋼管杭式擁壁）	No	－		○
		防波壁（逆Ｔ擁壁）	Yes	Yes	施設下部は改良地盤等に囲まれるが，その外側の液状化検討対象層の影響を無視できない。	○
		防波壁（波返重力擁壁）	No	－		○
		１号炉取水槽流路縮小工	No	－		○
		防波壁通路防波扉	Yes	Yes	施設下部は改良地盤等に囲まれるが，その外側の液状化検討対象層の影響を無視できない。	○
重大事故等対処施設		第１ベントフィルタ格納槽	Yes	Yes	施設は改良地盤等に囲まれるが，その外側の液状化検討対象層の影響を無視できない。	○
		低圧原子炉代替注水ポンプ格納槽	Yes	No	施設が改良地盤等に囲まれ，その外側に液状化検討対象層がないことから，液状化の影響はない。	×

※　詳細設計段階で実施する浸透流解析の結果を踏まえ，改めて液状化検討対象施設を選定した上で解析手法の選定を行う。

・取水槽

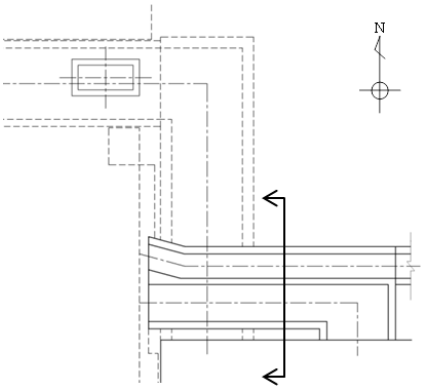
取水槽の設置状況を第4-2-4 図に示す。取水槽は岩盤上に設置されており，周辺はMMR及び埋戻土（掘削ズリ）が分布している。

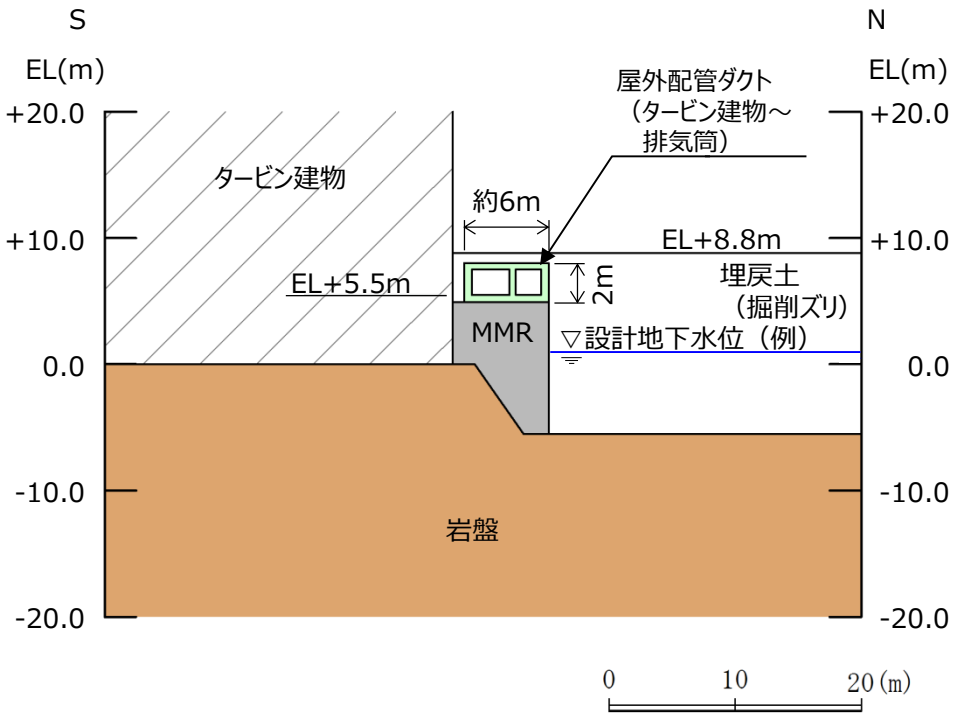


第4-2-4 図　取水槽　平面図

・屋外配管ダクト（タービン建物～排気筒）

屋外配管ダクト（タービン建物～排気筒）の設置状況を第4-2-5 図に示す。屋外配管ダクト（タービン建物～排気筒）はMMRを介して岩盤上に設置されており，周辺は埋戻土（掘削ズリ）が分布している。

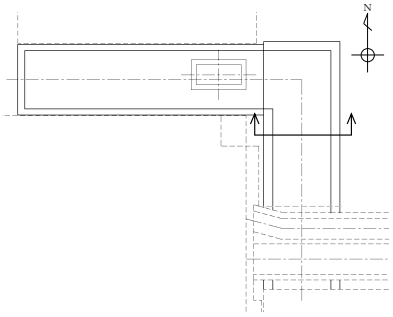


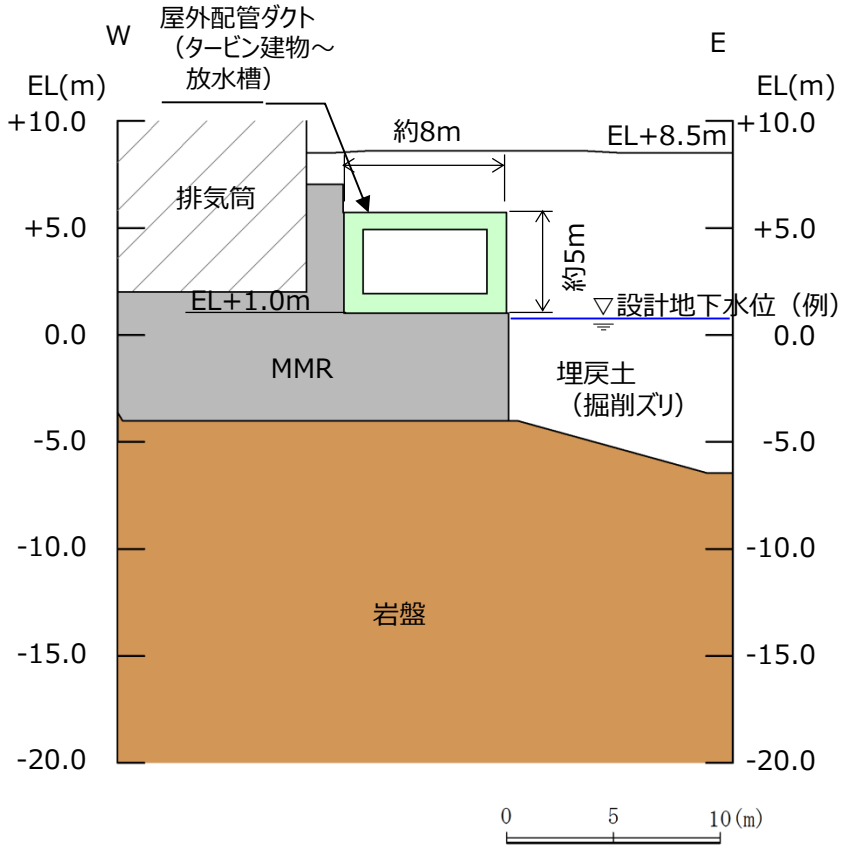


第4-2-5 図　屋外配管ダクト（タービン建物～排気筒）　断面図

・屋外配管ダクト（タービン建物～放水槽）

屋外配管ダクト（タービン建物～放水槽）の設置状況を第4-2-6 図に示す。屋外配管ダクト（タービン建物～放水槽）はMMRを介して岩盤上に設置されており，周辺は埋戻土（掘削ズリ）が分布している。

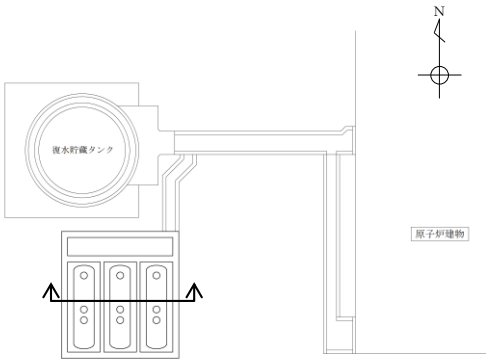


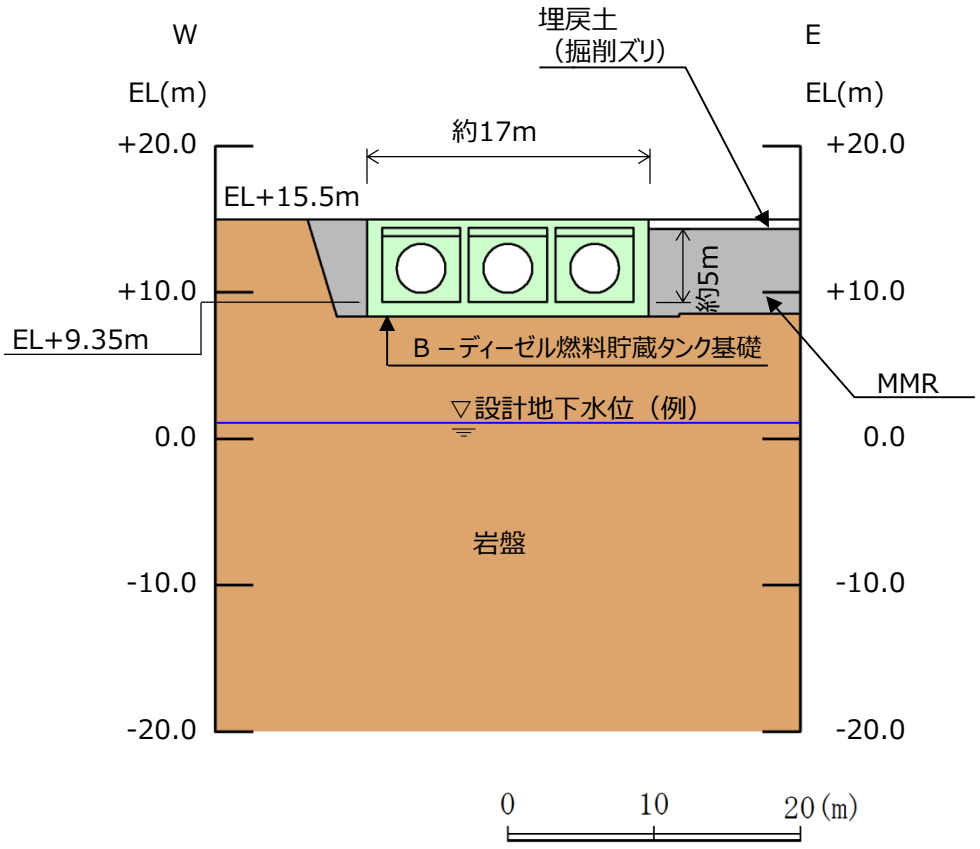


第4-2-6 図　屋外配管ダクト（タービン建物～放水槽）　断面図

・Ｂ－ディーゼル燃料貯蔵タンク基礎

Ｂ－ディーゼル燃料貯蔵タンク基礎の設置状況を第4-2-7 図に示す。Ｂ－ディーゼル燃料貯蔵タンク基礎は岩盤上に設置されており，周辺はMMRが分布している。

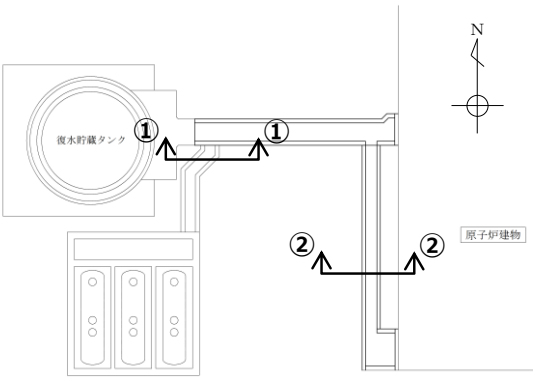


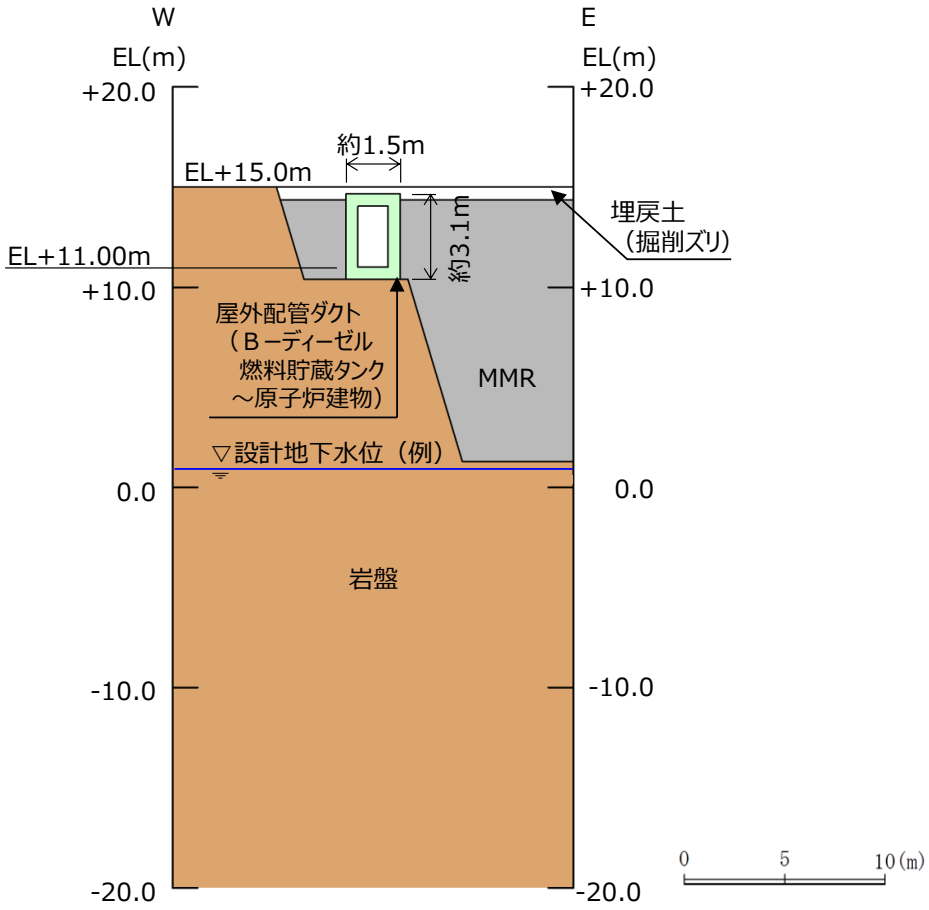


第4-2-7 図　Ｂ－ディーゼル燃料貯蔵タンク基礎　断面図

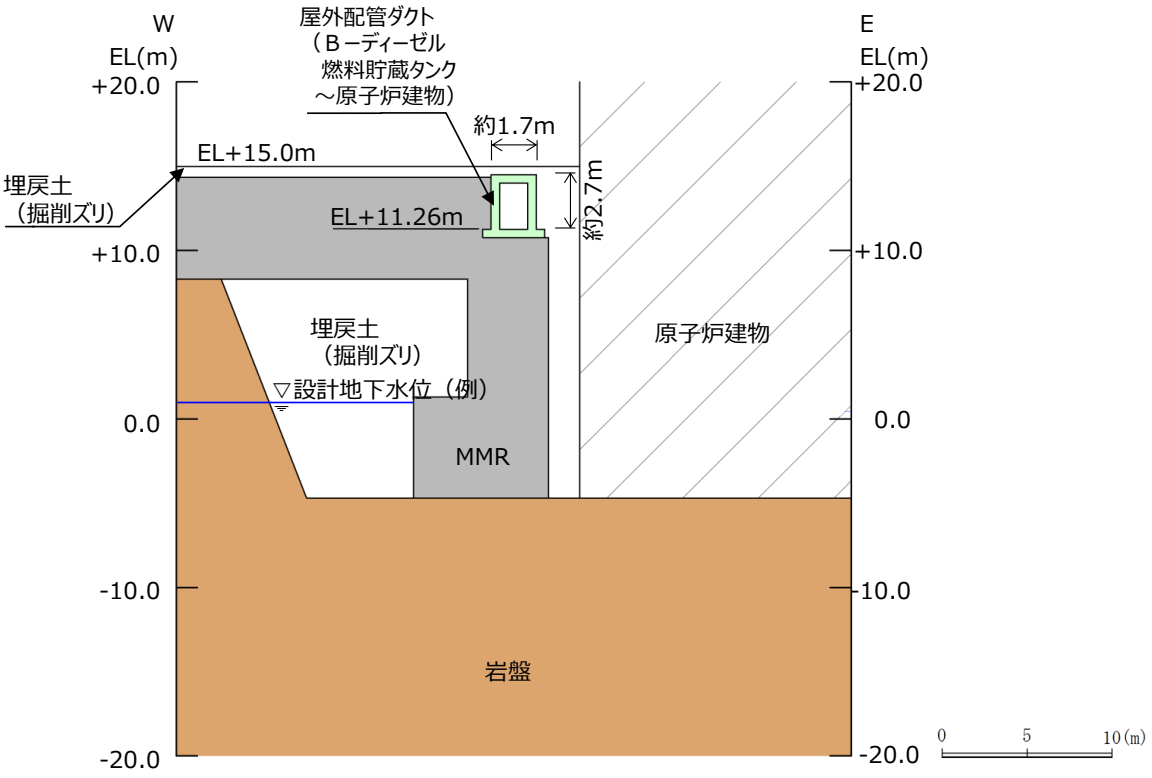
・屋外配管ダクト（Ｂ－ディーゼル燃料貯蔵タンク～原子炉建物）

屋外配管ダクト（Ｂ－ディーゼル燃料貯蔵タンク～原子炉建物）の設置状況を第4-2-8 図及び第4-2-9 図に示す。屋外配管ダクト（Ｂ－ディーゼル燃料貯蔵タンク～原子炉建物）は岩盤上及びＭＭＲを介して岩盤上に設置されており，周辺はＭＭＲ及び埋戻土（掘削ズリ）が分布している。





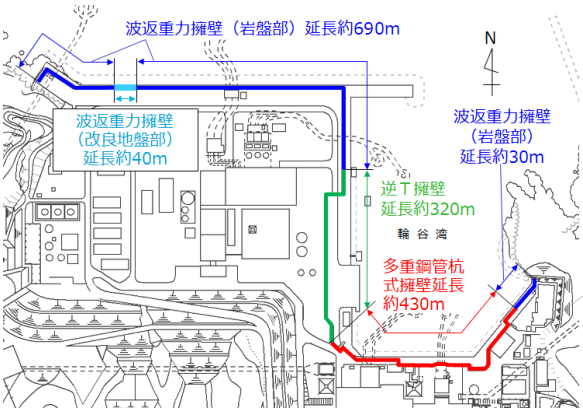
第4-2-8 図　屋外配管ダクト（Ｂ－ディーゼル燃料貯蔵タンク～原子炉建物）
①－①断面図

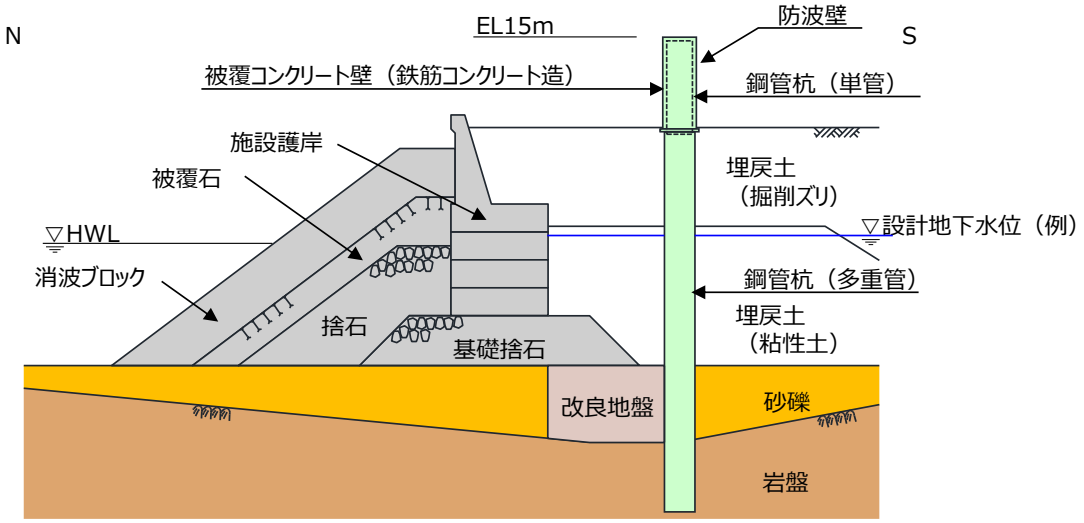


第4-2-9 図　屋外配管ダクト（Bーディーゼル燃料貯蔵タンク～原子炉建物）
②－②断面図

・防波壁（多重鋼管杭式擁壁）

防波壁（多重鋼管杭式擁壁）における地下水位・設備の設置状況を第4-2-10 図に示す。防波壁（多重鋼管杭式擁壁）は鋼管杭（多重管）により岩盤支持されており，周辺は埋戻土（掘削ズリ），埋戻土（粘性土）及び砂礫層が分布している。

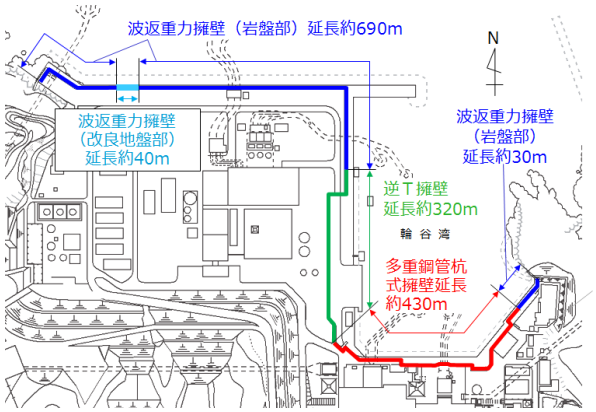


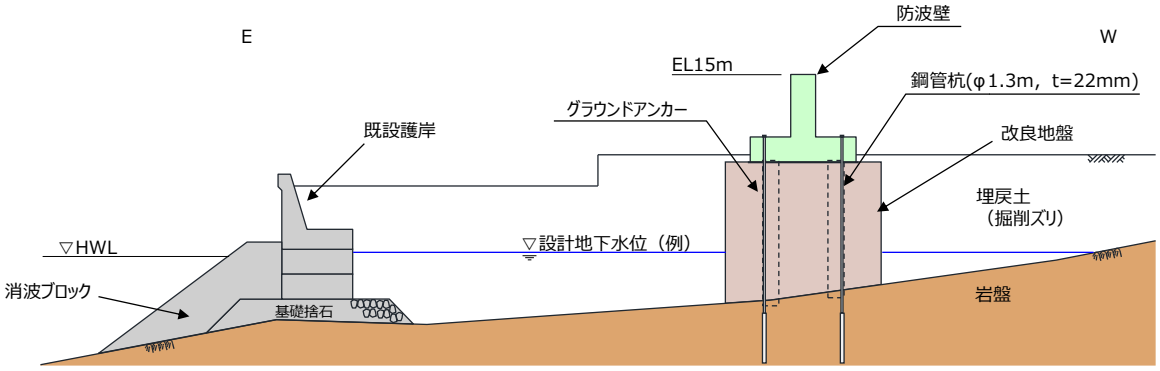


第4-2-10 図　防波壁（多重鋼管杭式擁壁）　断面図

・防波壁（逆Ｔ擁壁）

防波壁（逆Ｔ擁壁）の設置状況を第4-2-11 図に示す。防波壁（逆Ｔ擁壁）は改良地盤により岩盤支持されており，周辺は埋戻土（掘削ズリ）が分布している。

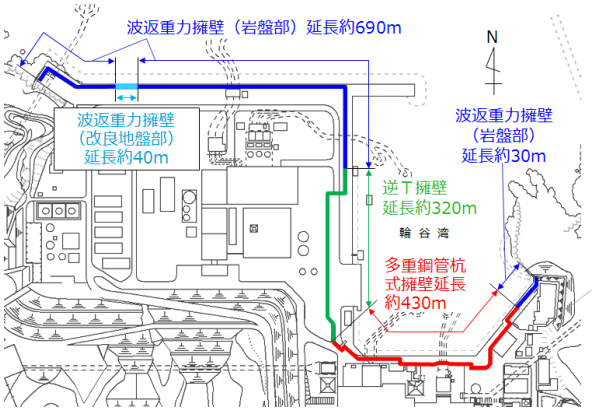


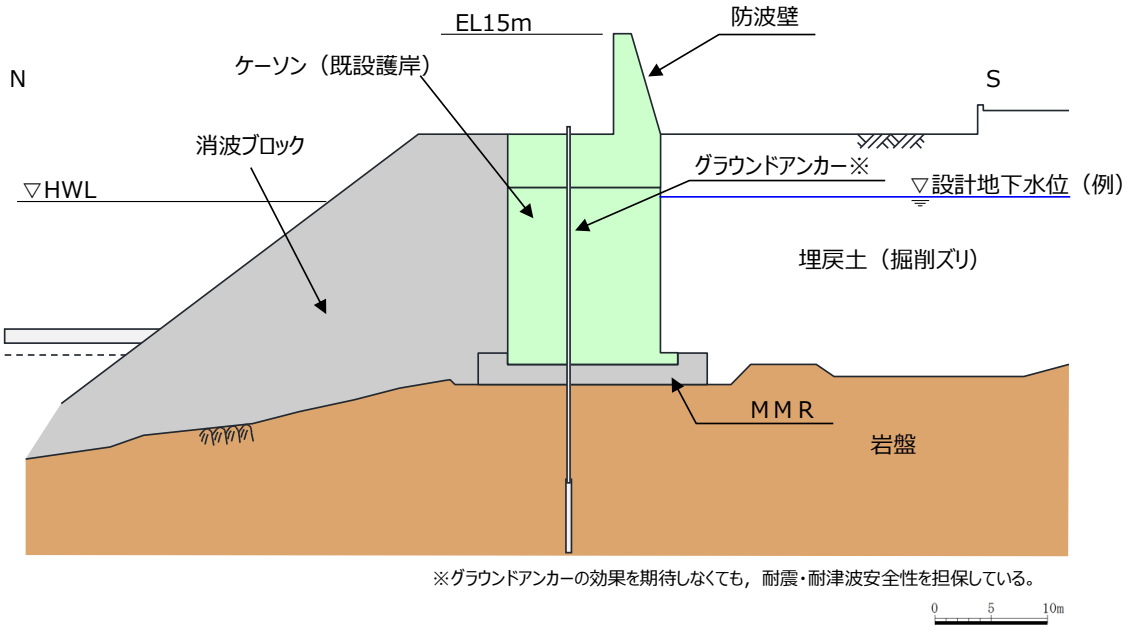


第4-2-11 図　防波壁（逆Ｔ擁壁）　断面図

・防波壁（波返重力擁壁）

防波壁（波返重力擁壁）の設置状況を第4-2-12 図に示す。防波壁（波返重力擁壁）はMMRを介して岩盤上に設置されており，周辺は埋戻土（掘削ズリ）が分布している。

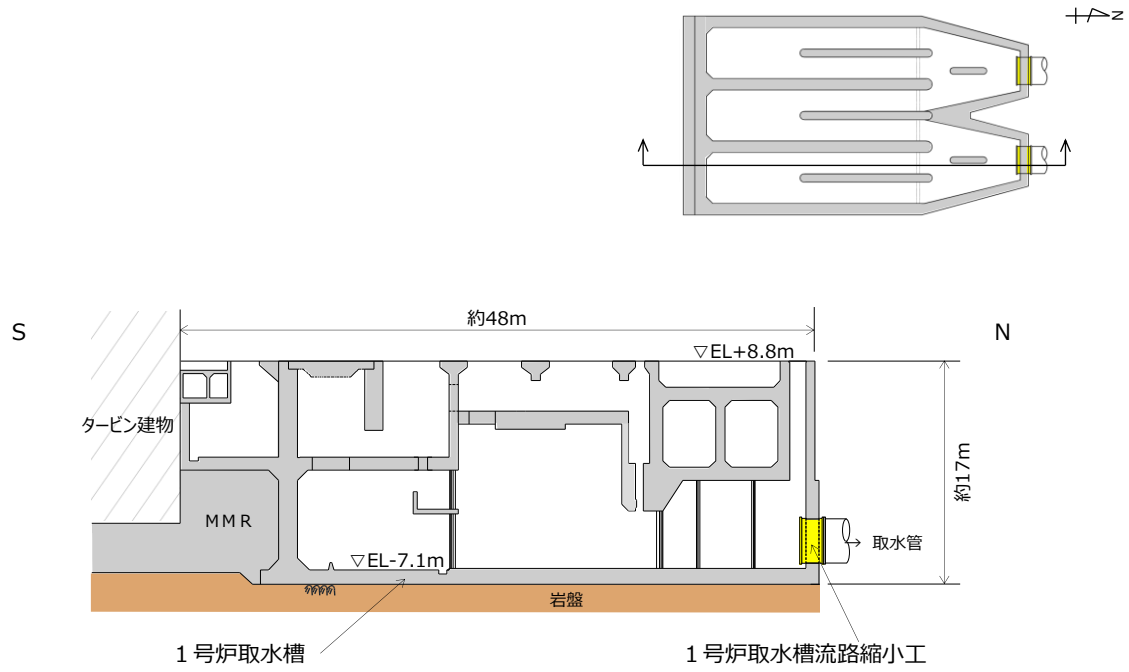




第4-2-12 図　防波壁（波返重力擁壁（岩盤部））　断面図

・１号炉取水槽流路縮小工

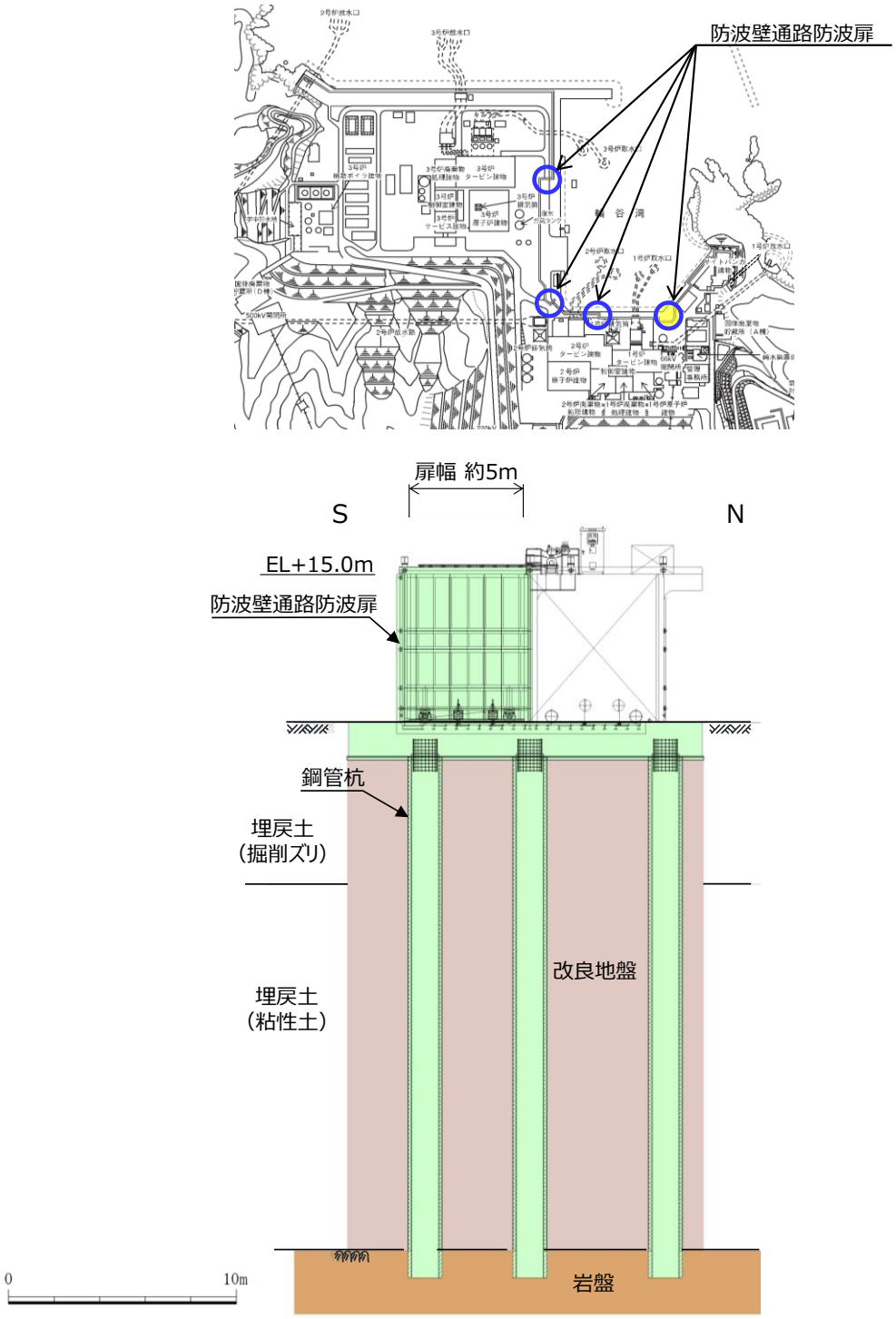
１号炉取水槽流路縮小工の設置状況を第4-2-13 図に示す。１号炉取水槽流路縮小工は１号炉取水槽北側壁を介して岩盤上に設置されており，周辺はＭＭＲ，埋戻土（掘削ズリ）及び埋戻土（粘性土）が分布している。



第4-2-13 図　１号炉取水槽流路縮小工　断面図

・防波壁通路防波扉

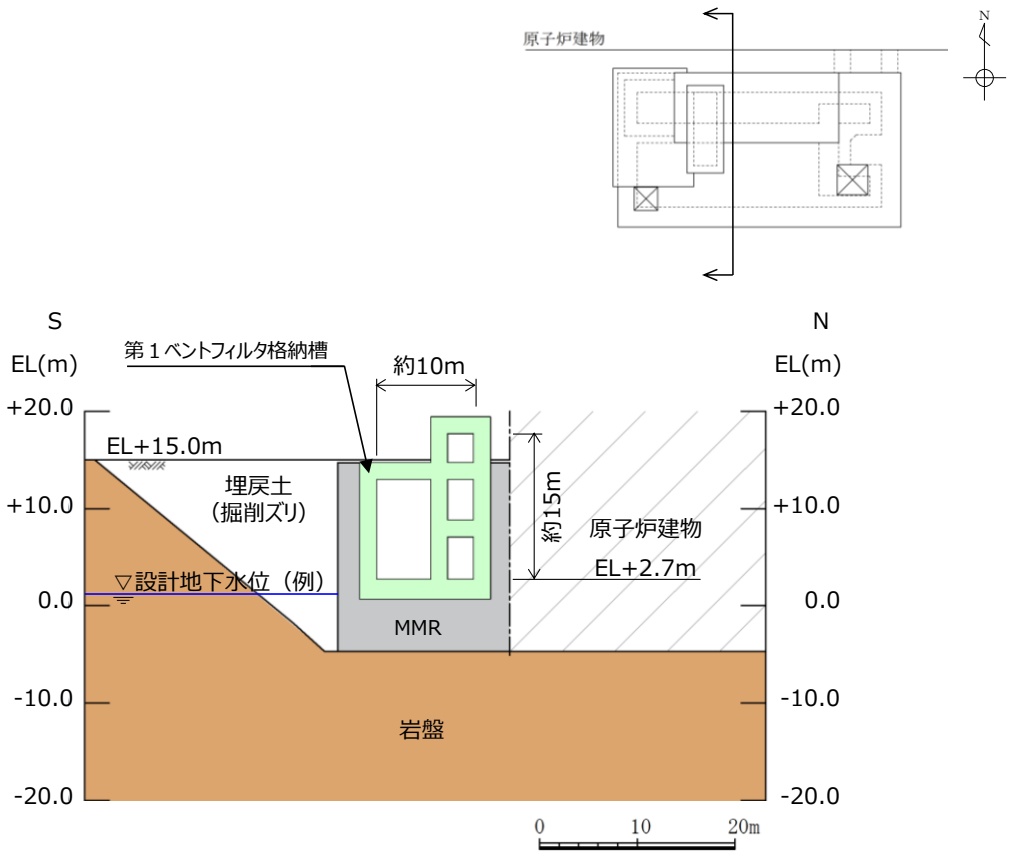
防波壁通路防波扉（１，２号炉北側）の設置状況を第4-2-14 図に示す。防波壁通路防波扉（１，２号炉北側）は鋼管杭により岩盤支持されており，周辺は改良地盤，埋戻土（掘削ズリ）及び埋戻土（粘性土）が分布している。



第4-2-14 図　防波壁通路防波扉（１，２号炉北側）　正面図

・第１ベントフィルタ格納槽

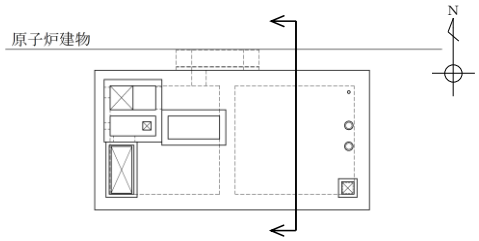
第１ベントフィルタ格納槽の設置状況を第4-2-15 図に示す。第１ベントフィルタ格納槽はMMRを介して岩盤上に設置されており，周辺はMMR及び埋戻土（掘削ズリ）が分布している。

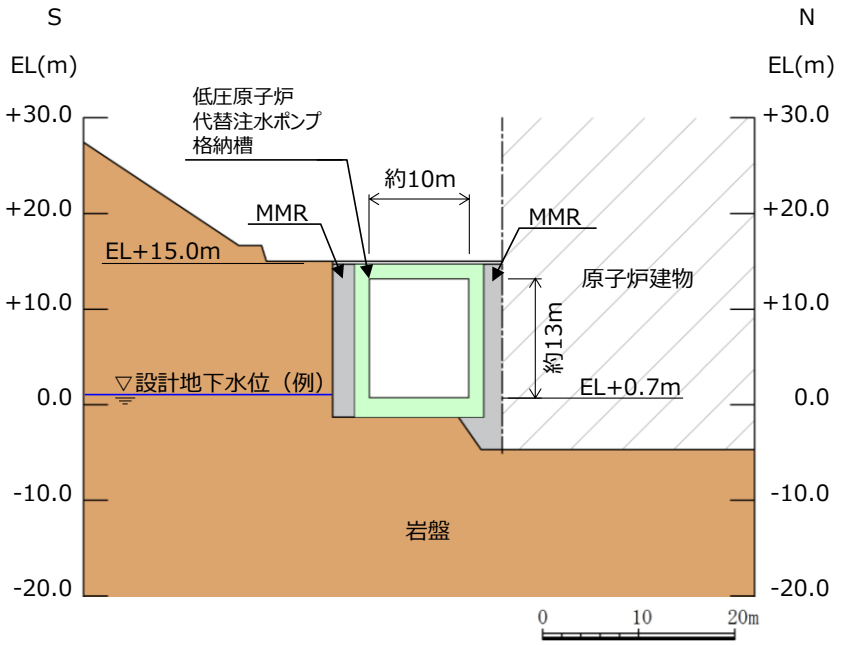


第4-2-15 図　第１ベントフィルタ格納槽　断面図

・低圧原子炉代替注水ポンプ格納槽

低圧原子炉代替注水ポンプ格納槽の設置状況を第4-2-16 図に示す。低圧原子炉代替注水ポンプ格納槽は岩盤上に設置されており，周辺はMMR及び埋戻土（掘削ズリ）が分布している。





第4-2-16 図　低圧原子炉代替注水ポンプ格納槽　断面図

5. 参考文献

・道路橋示方書：道路橋示方書・同解説（Ⅴ耐震設計編），（社）日本道路協会，H24.3
・港湾基準：港湾の施設の技術上の基準・同解説，（社）日本港湾協会，H19年版
・港湾構造物設計事例集，沿岸技術研究センター，H19年版
・地盤工学会基準JGS4001：性能設計概念に基づいた基礎構造物等に関する設計原則（H18）
・地盤工学会,H21：地盤材料試験の方法と解説，平成21 年11 月
・安田,H3：液状化の調査から対策工まで，安田進，鹿島出版会，H3.5
・吉田,H22：地盤の地震応答解析，吉田望，鹿島出版会，H22.10
・土木学会,H15：過剰間隙水圧の発生過程が地盤の地震応答に与える影響，土木学会地震工学委員会レベル２地震動による液状化研究小委員会 レベル２地震動による液状化に関するシンポジウム論文集，pp397-400，H15.6
・地盤工学会,H18：地盤工学用語辞典，pp219-220，H18.3
・井合進,H20：サイクリックモビリティCyclic Mobility，地盤工学会誌，56-8，H20.3
・吉見吉昭,H3：砂地盤の液状化（第二版），技報堂出版，H3.5
・井合進，飛田哲男，小堤治(H20)：砂の繰返し載荷時の挙動モデルとしてのひずみ空間多重モデルにおけるストレスダイレイタンシー関係，京都大学防災研究所年報，第51 号，pp.291-304，H20
・鉄道総合技術研究所(H24)：鉄道構造物等設計標準・同解説，H24.9
・Iai, S., Matsunaga,Y. and Kameoka,T(1992): STRAIN SPACE PLASTICITY MODEL FOR CYCLIC MOBILITY, SOILS AND FOUNDATIONS, Vol,32, No. 2, pp.1-15.
・Iai. S.,Morita, T.,Kameoka, T., Matsunaga, Y. and Abiko, K. (1995):RESPONSE OF A DENSE SAND DEPOSIT DURING 1993 KUSHIRO-OKI EARTHQUAKE, SOILS AND FOUNDATIONS, Vol,35, No.1, pp.115-131.
・コンクリート標準示方書[構造性能照査編]，（社）土木学会，H14 年制定
・建築物荷重指針・同解説，日本建築学会，H16年版
・建築物の構造関係技術基準解説書，国土交通省住宅局建築指導課，国土交通省国土技術政策総合研究所，独立行政法人建築研究所，日本建築行政会議 監修，H19.8
・森田ら,H9：液状化による構造物被害予測プログラムFLIPにおいて必要な各種パラメタの簡易設定法，運輸省港湾技術研究所，港湾技研資料，No.869，H9.6
・第四期FLIP研究会14年間のまとめWG,H23：液状化解析プログラムFLIPによる動的解析の実務，財団法人沿岸技術研究センター，H23.8
・地盤工学会，H22：土質試験　基本と手引き
・兵庫県南部地震による港湾施設の被害考察：運輸省港湾技術研究所，港湾技研資料，No.813，H7

別紙－12

島根原子力発電所２号炉

既設設備に対する
耐震補強等について

1.　はじめに

本資料では，建設工認あるいは改造工認（以下，併せて「既工認」という。）で認可されている構造からの変更点のうち耐震性に影響のあるものをまとめている。なお，本資料に記載している設備の構造については，詳細設計段階で追加変更が生じる可能性がある。

2.　既設設備の既工認からの構造変更点について

建物・構築物，機器・配管系，屋外重要土木構造物における既工認からの構造変更実績の一覧を添付資料１に示す。また，これらの構造変更実績のある設備について，変更点の概要を添付資料２に示す。添付資料２に示した各設備の構造変更を反映し，耐震評価を行う。

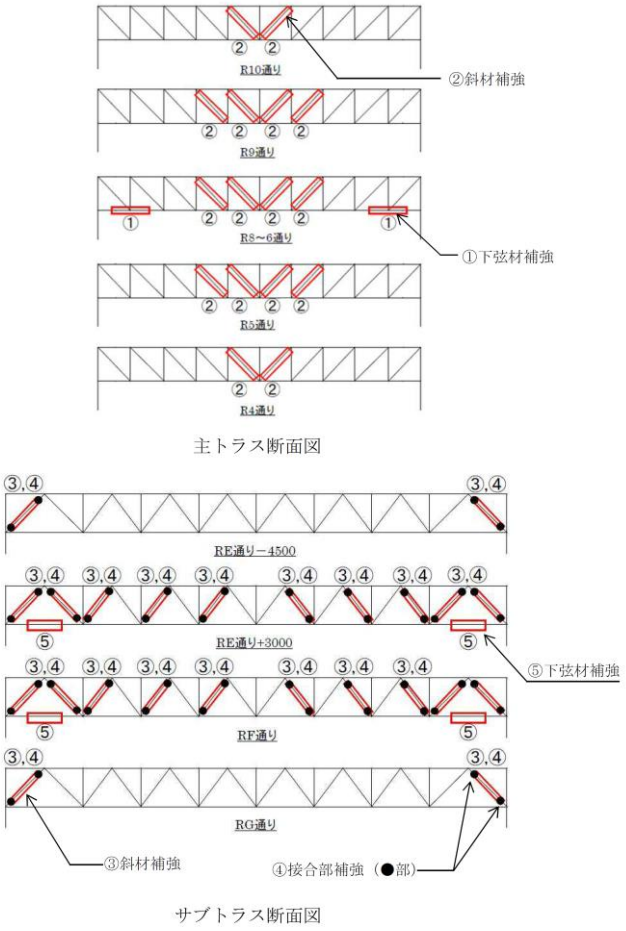
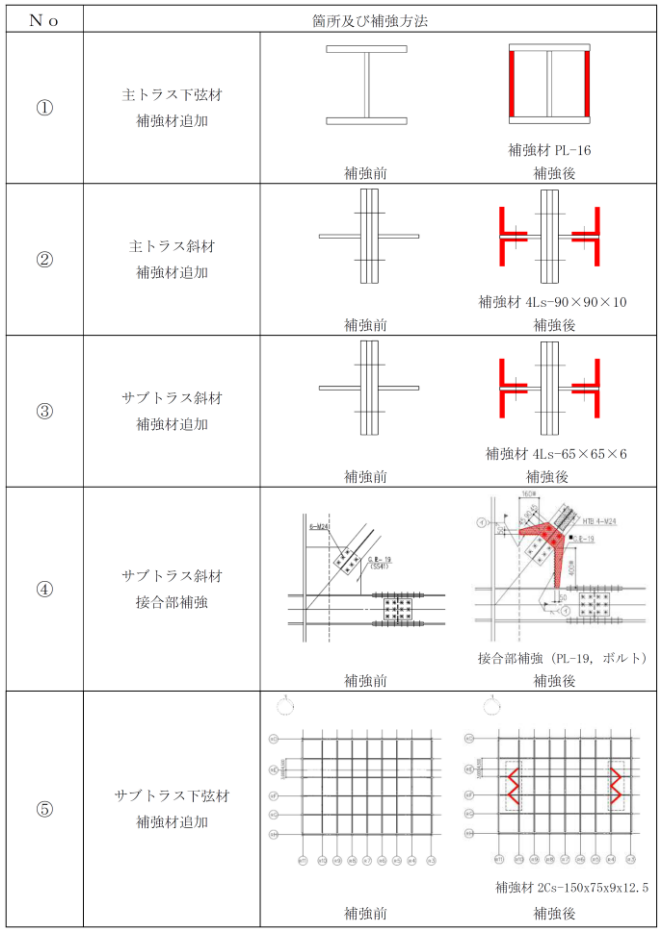
また，既設設備の構造変更に関して，基本設計段階の設計方針等の記載への反映要否について添付資料３に整理する。

添付資料１

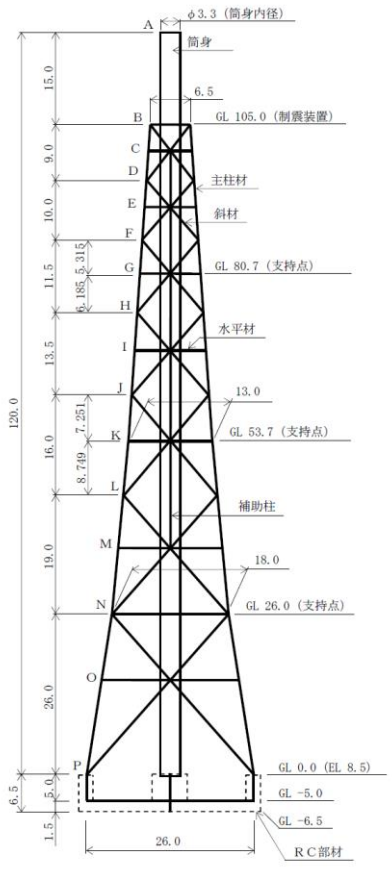
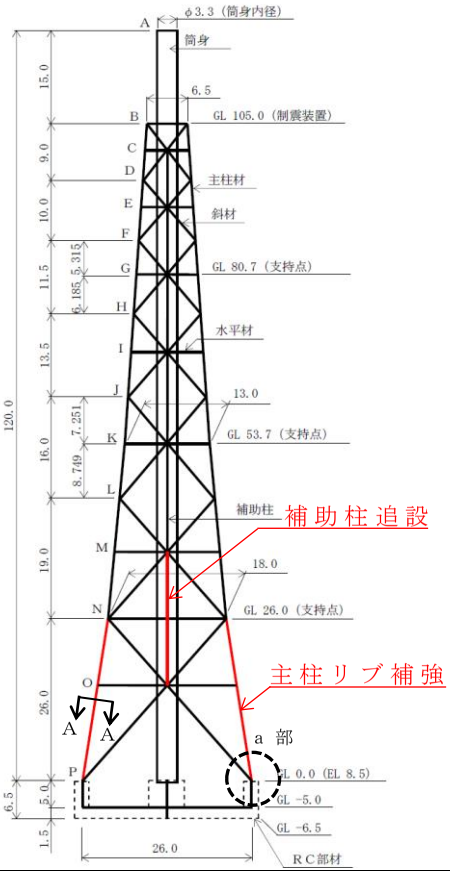
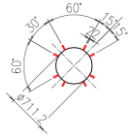
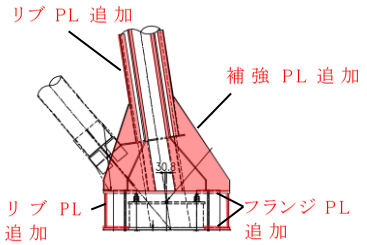
島根２号炉　既工認からの構造変更実績のある設備

	施設・設備名称		構造変更の概要	備考
建物・構築物	原子炉建物屋根トラス		・主トラス，サブトラスに補強材を追設	
	排気筒		・補助柱を追設 ・主柱リブ補強 ・鉄塔脚部補強	
機器・配管系	原子炉格納容器	スタビライザ	・フランジボルトの材質変更	
		電気配線貫通部	・支持構造物を追設	
	残留熱除去系熱交換器		・熱交換器の下部胴板に支持構造物を追設	
	原子炉補機冷却系熱交換器		・熱交換器脚部の支持構造物に補強部材を追設	
	制御棒駆動水圧系水圧制御ユニット		・架構部に補強部材を追設	
	原子炉補機海水ポンプ		・長尺化 ・支持構造物の追設および位置変更	
	高圧炉心スプレイ補機海水ポンプ		・長尺化 ・支持構造物の追設	
	圧力低減設備	ダウンカマ	・補強リブを追設	
		ベントヘッダ	・支持構造物の取替	
		ベント管	・補強リブを追設	
	燃料取替機		・トロリ補強 ・ブリッジおよびトロリ脱線防止ラグ補強 ・走行レール交換	
	原子炉建物天井クレーン		・落下防止ラグおよびトロリストッパの形状変更	
	配管系		・配管の追設	例として格納容器フィルタベント系配管を示す
			・サポートの追設および強化	例として残留熱除去系配管を示す
屋外重要土木構造物	取水槽		・スクリーン室に後施工せん断補強鉄筋を追設	

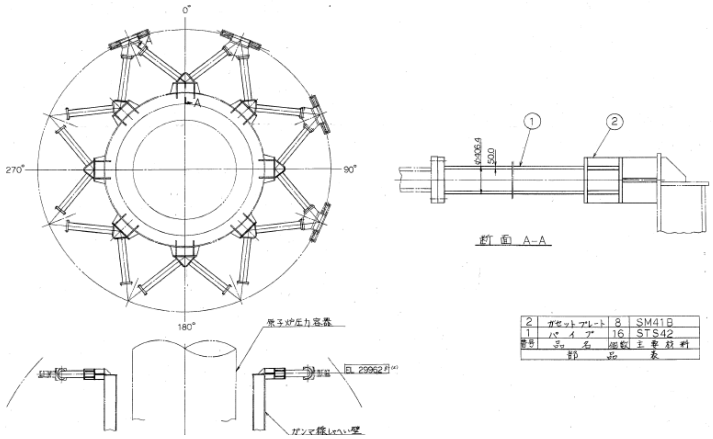
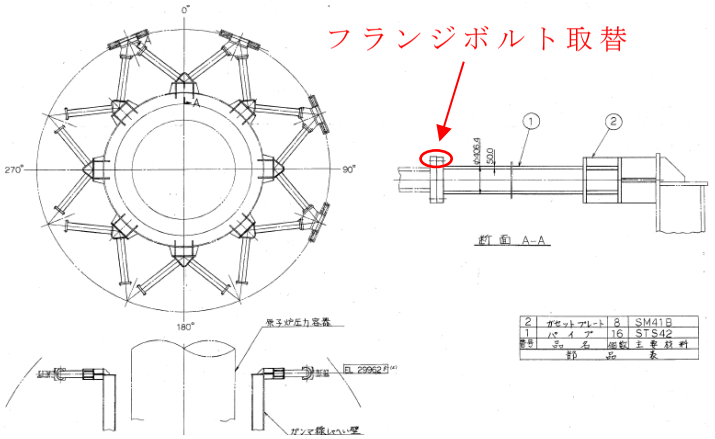
原子炉建物屋根トラスの耐震強化による変更点

変更概要	備考
 主トラス断面図 サブトラス断面図 	・主トラス ①下弦材補強材追加 ②斜材補強材追加 ・サブトラス ③斜材補強材追加 ④接合部補強 ⑤下弦材補強材追加

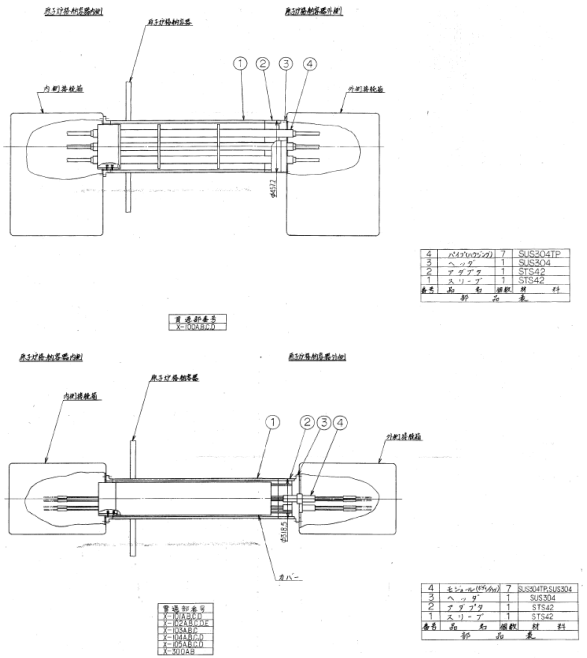
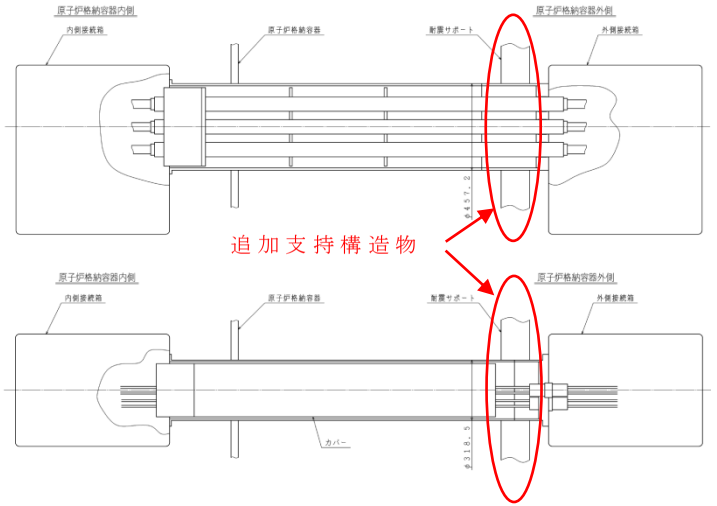
排気筒の耐震強化による変更点

変更前	変更後	備考
	  主柱リブ補強部 断面図（A－A）  鉄塔脚部補強図 （a 部）	・補助柱を追設 ・主柱リブ補強 ・鉄塔脚部補強

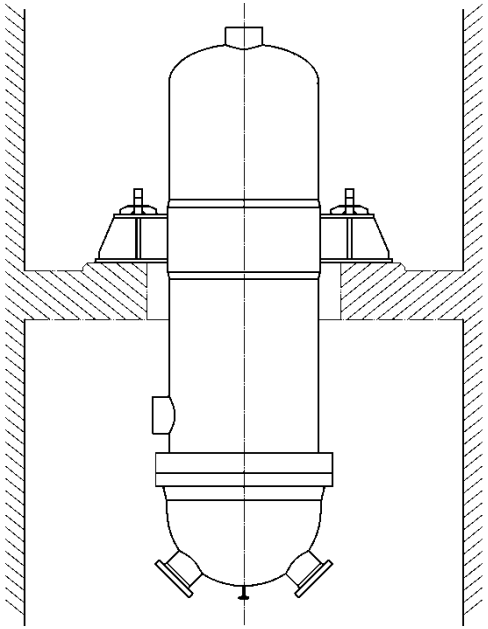
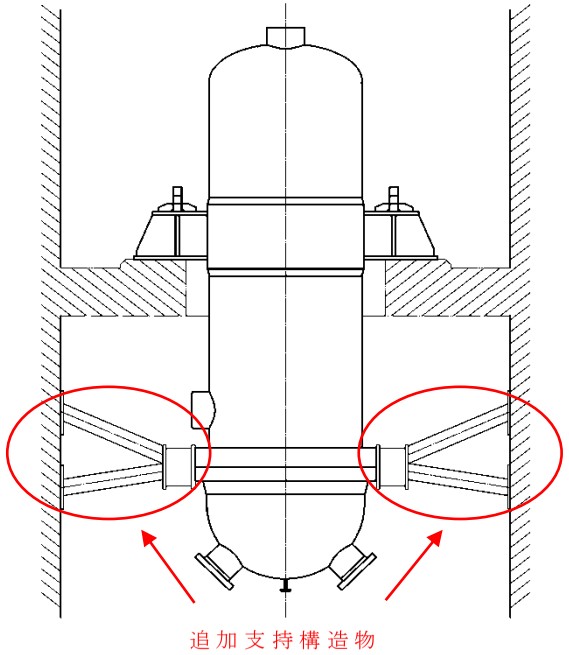
原子炉格納容器（スタビライザ）の耐震強化による変更点

変更前	変更後	備考
	 図中変更なし	フランジボルトの材質変更（SNCM439→SNB24-1）

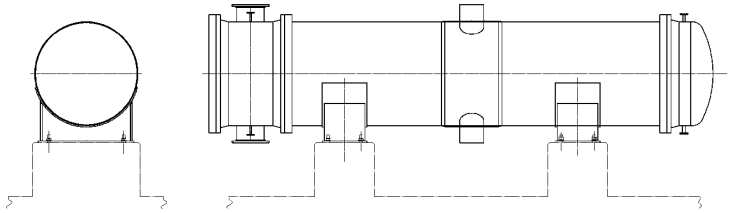
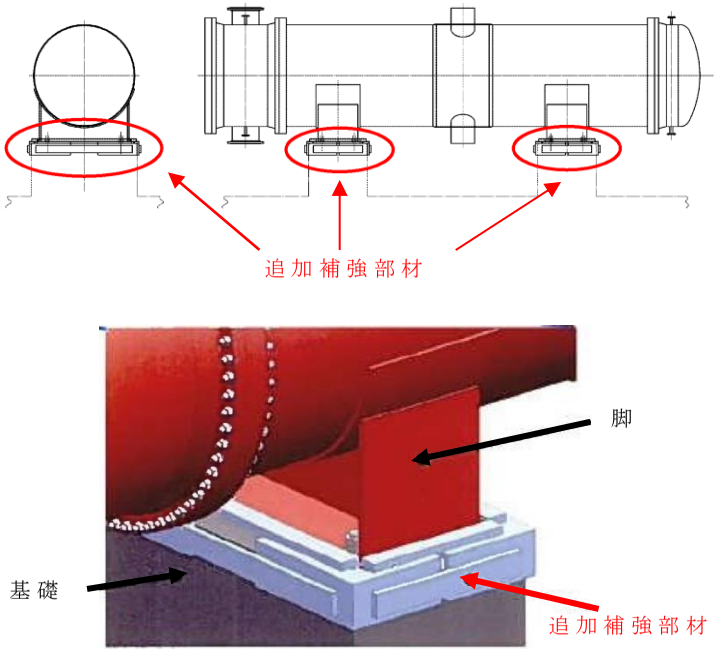
原子炉格納容器（電気配線貫通部）の耐震強化による変更点

変更前	変更後	備考
		支持構造物を追設

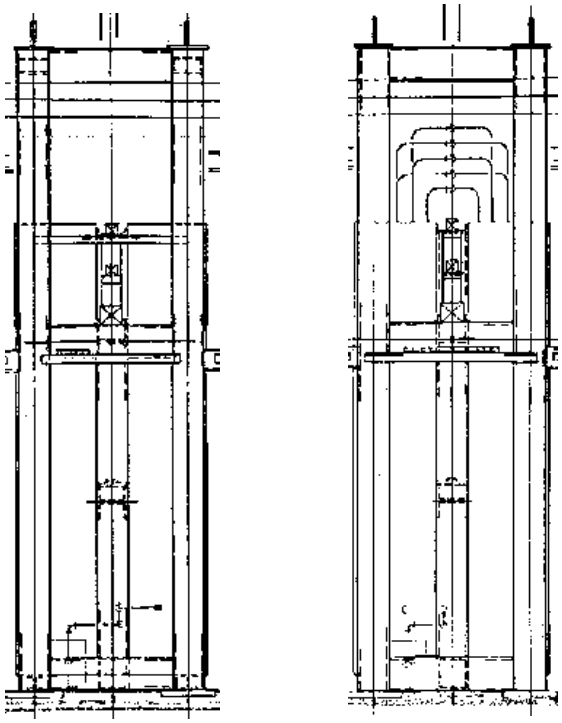
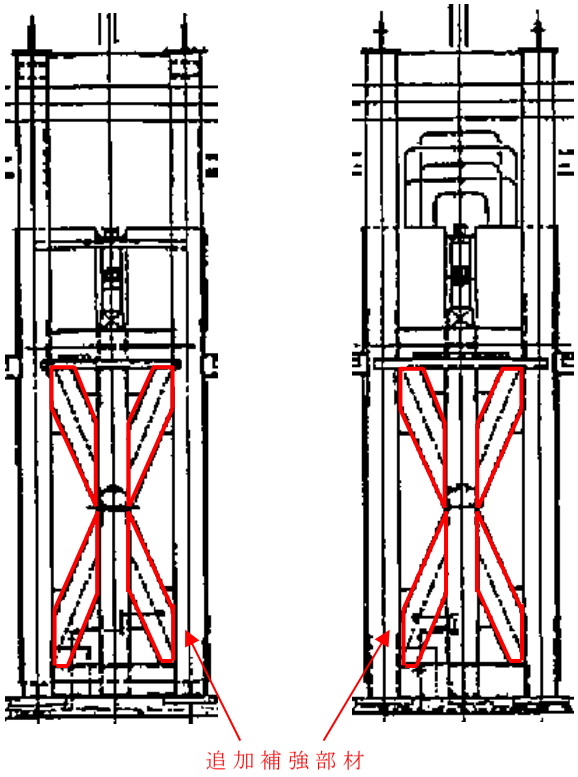
残留熱除去系熱交換器の耐震強化による変更点

変更前	変更後	備考
		支持構造物を追設

原子炉補機冷却系熱交換器の耐震強化による変更点

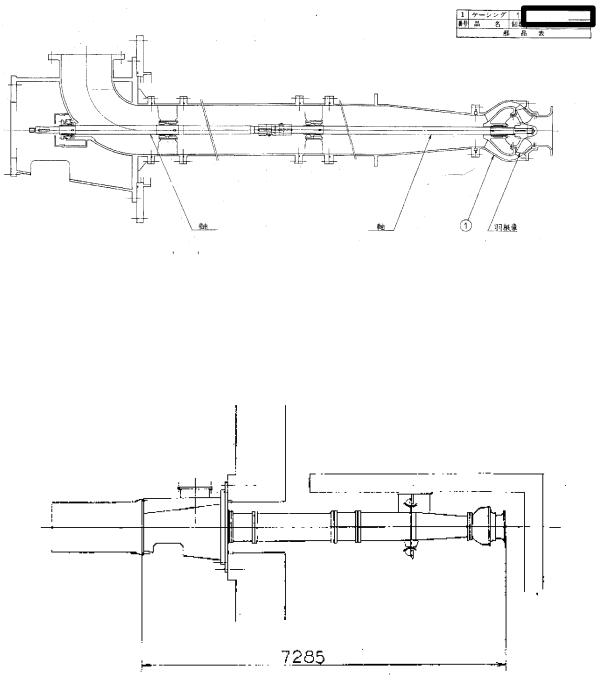
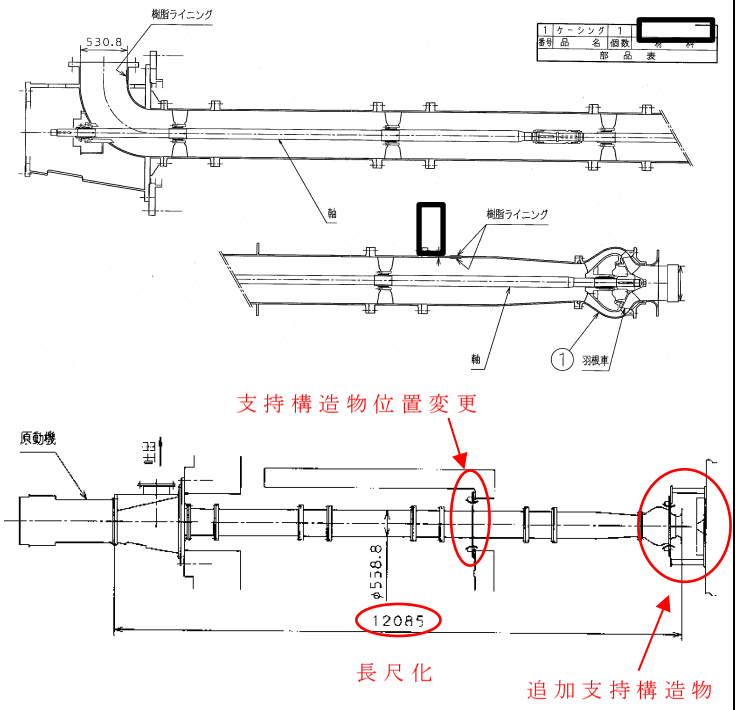
変更前	変更後	備考
		補強部材を追設

制御棒駆動水圧系水圧制御ユニットの耐震強化による変更点

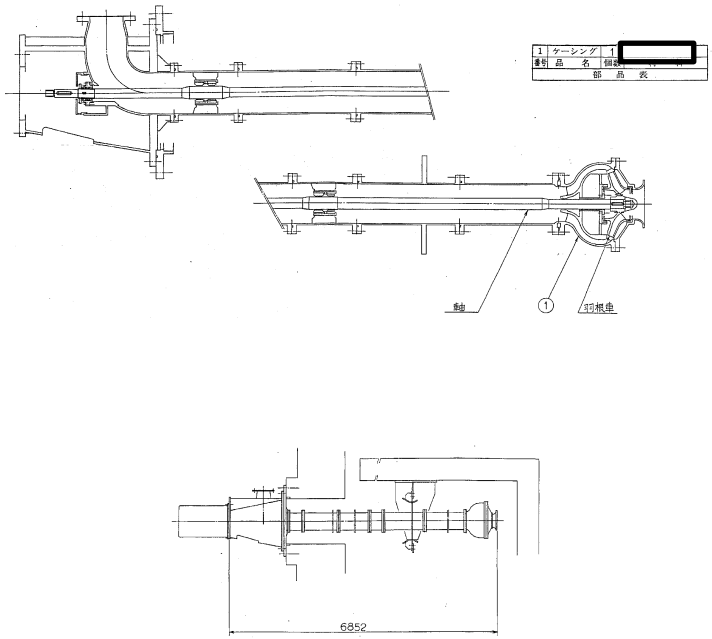
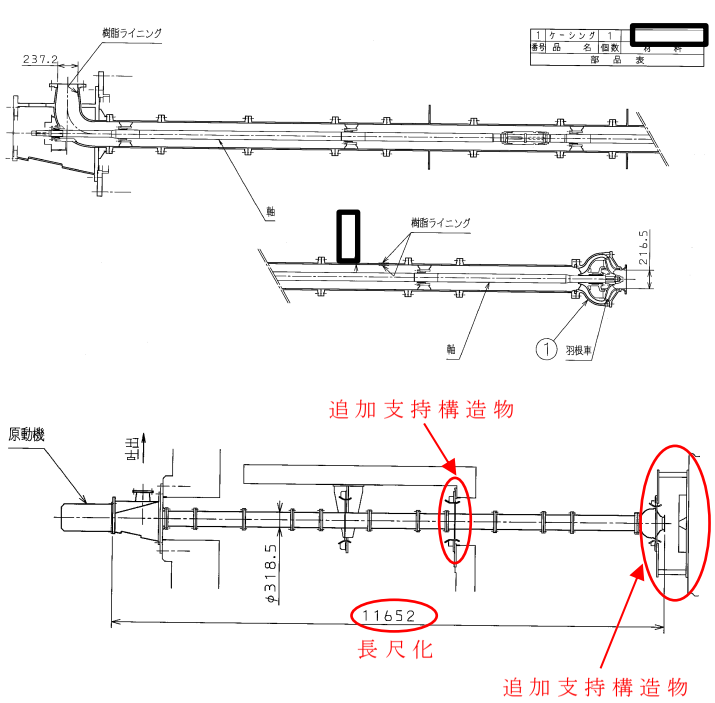
変更前	変更後	備考
		補強部材を追設

本資料のうち，枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

原子炉補機海水ポンプの長尺化による変更点

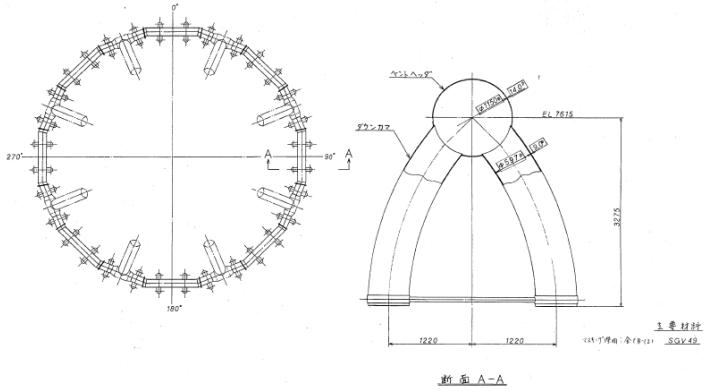
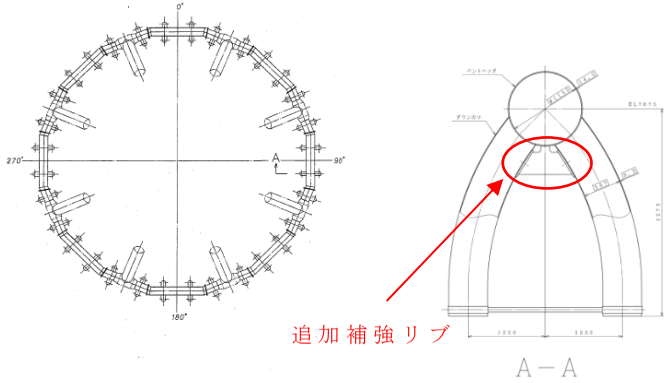
変更前	変更後	備考
		・ポンプを長尺化 ・支持構造物の追設および位置変更

高圧炉心スプレイ補機海水ポンプの長尺化による変更点

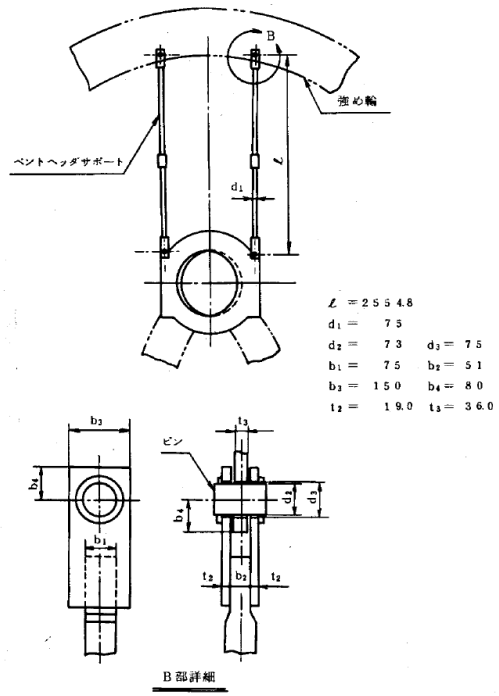
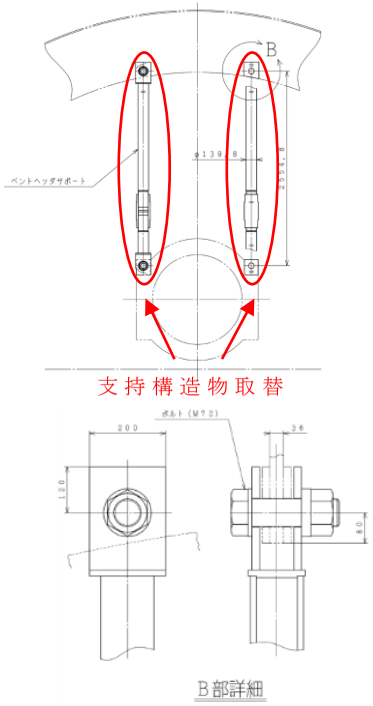
変更前	変更後	備考
		・ポンプを長尺化 ・支持構造物の追設

本資料のうち，枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

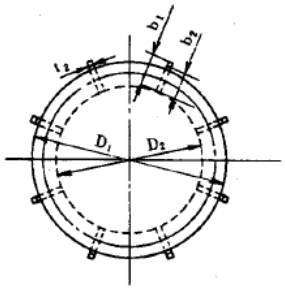
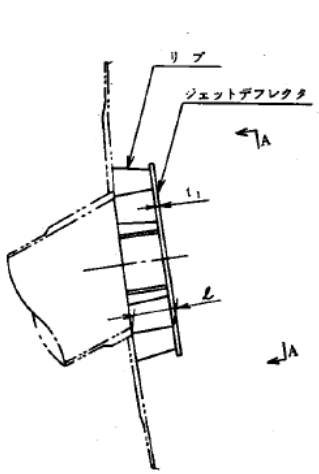
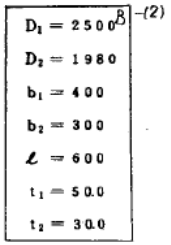
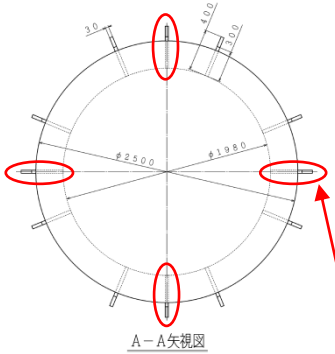
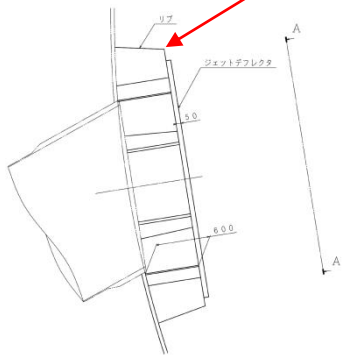
圧力低減設備（ダウンカマ）の耐震強化による変更点

変更前	変更後	備考
		補強リブを追設

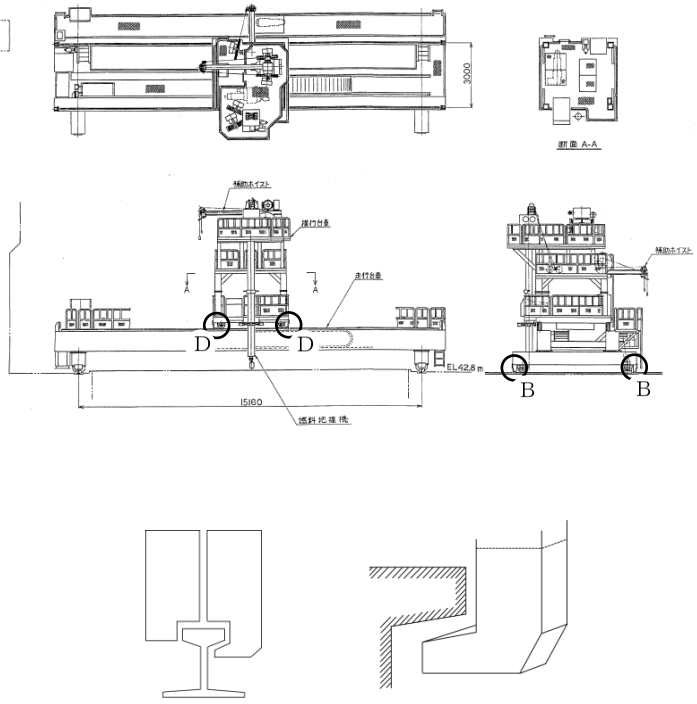
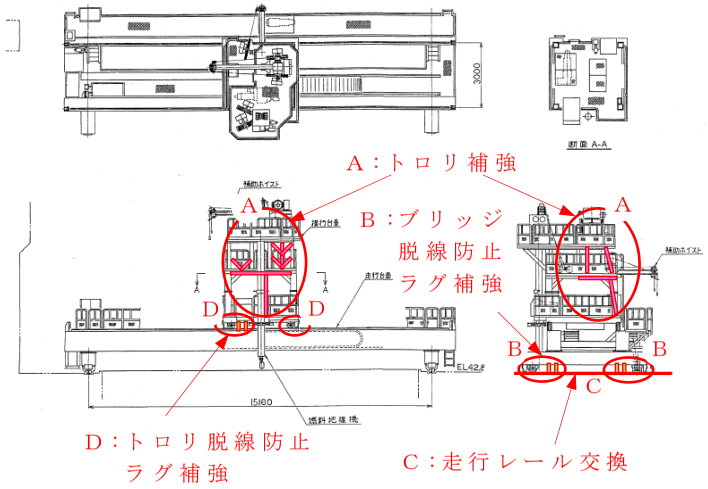
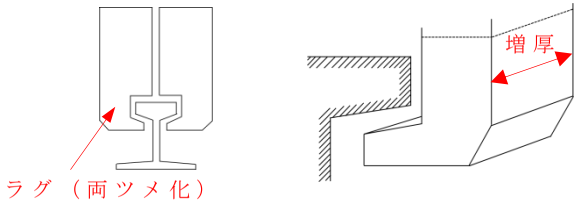
圧力低減設備（ベントヘッダ）の耐震強化による変更点

変更前	変更後	備考
		支持構造物の取替

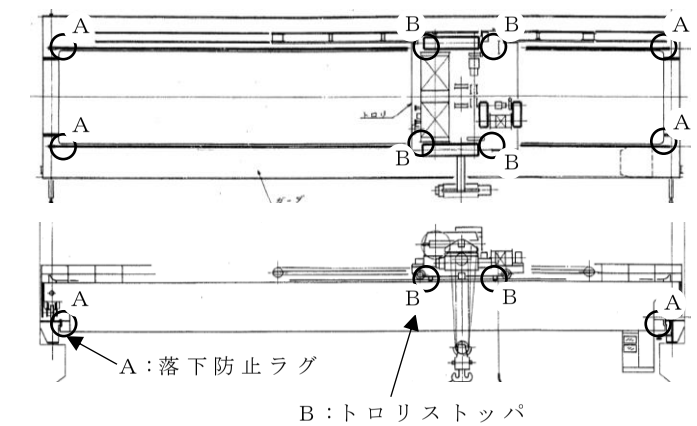
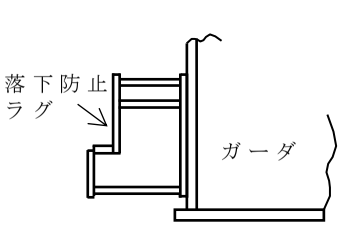
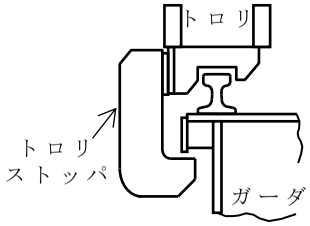
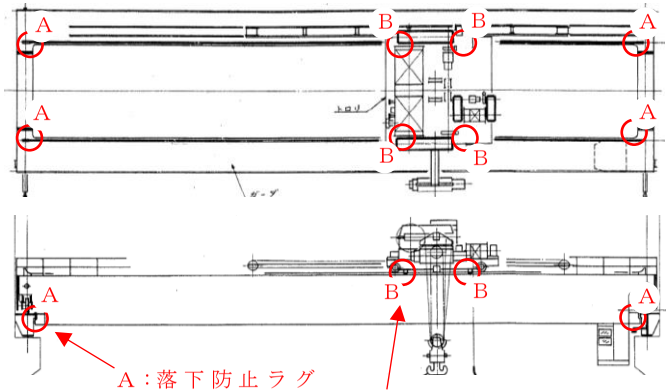
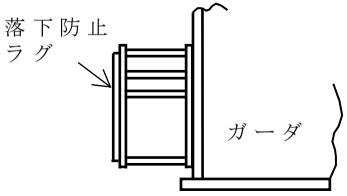
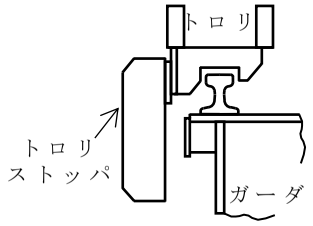
圧力低減設備（ベント管）の耐震強化による変更点

変更前	変更後	備考
		補強リブを追設

燃料取替機の耐震強化による変更点

変更前	変更後	備考
 B，D：ブリッジおよびトロリ 脱線防止ラグ	  B，D：ブリッジおよびトロリ 脱線防止ラグ補強	・A：トロリ補強 （一階柱，二階柱，二階床の追加および補強） ・B：ブリッジ脱線防止ラグ補強 （片側2箇所→6箇所，形状変更（厚さ，両フック）） ・C：走行レール交換 （サイズアップ） ・D：トロリ脱線防止ラグ補強 （片側2箇所→4箇所，形状変更（厚さ，両フック））

原子炉建物天井クレーンの耐震強化による変更点

変更前	変更後	備考
  A：落下防止ラグの形状  B：トロリストッパの形状	  A：落下防止ラグの形状  B：トロリストッパの形状	落下防止ラグおよびトロリストッパの形状変更

配管系の変更点（配管の追設）

変更前	変更後	備考
		例として格納容器フィルタベント系配管を示す（窒素ガス制御系と非常用ガス処理系の連絡部を改造し，フィルタ装置に向かう配管を追設）

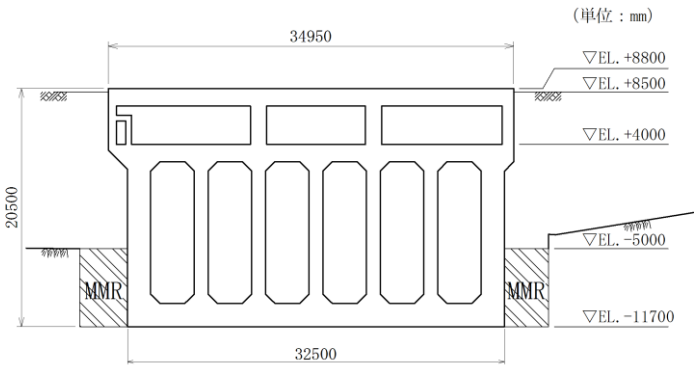
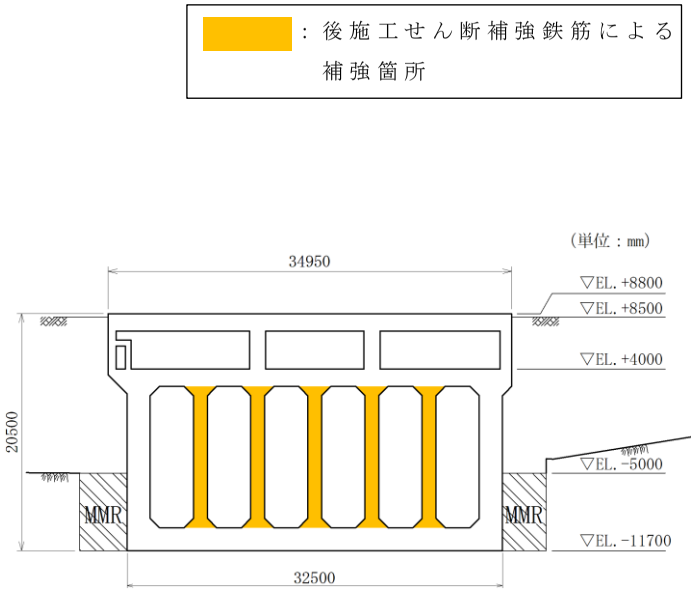
本資料のうち，枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

配管系の変更点（サポートの追設および強化）

変更前	変更後	備考
		例として残留熱除去系配管を示す （配管の変更はなし） （配管系の耐震強化の例）

本資料のうち，枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

取水槽の耐震強化による変更点

変更前	変更後	備考
 取水槽（スクリーン室）	 取水槽（スクリーン室）	スクリーン室に後施工せん断補強鉄筋（ポストヘッドバー工法）の追設

添付資料３

既設設備の構造変更に対する設計方針等への記載反映の要否について

既設設備の構造変更に関して，基本設計段階の設計方針等の記載への反映要否について整理する。検討に際しては，設計方針等への反映が必要となる項目として①～③の観点で確認を行い，その整理結果を表１に示す。

① 解析手法

解析モデルの作成，地震応答解析，設計用減衰定数等の地震応答解析手法として，既往設計方針の記載の範囲に加えて，新たな解析手法を採用する。

② 許容限界

評価に用いる許容限界として，構造変更により既往設計方針の記載の範囲に加えて，新たな許容限界を採用する。

③ 主要構造

原子炉建物、原子炉格納容器等の主要施設に対する基本構造の記載に対して変更が生じる。

表１に示すとおり，既許可の設計方針等に反映すべき事項として，機器・配管系の解析手法における非線形時刻歴応答解析の適用及び屋外重要土木構造物の解析手法における３次元 FEM モデルによる静的非線形解析の適用が抽出されたが，既に設計方針等に反映しており，新たに記載すべき事項は抽出されなかった。

表１　構造変更に対する設計方針等への反映要否

	施設・設備名称	構造変更の概要		設計方針等への反映の要否		
				項目	要否	備考
建物・構築物	原子炉建物屋根トラス	・主トラス，サブトラスに補強材を追設		①解析手法	－	新たな解析手法を用いないため，反映は不要
				②許容限界	－	新たな許容限界を用いないため，反映は不要
				③主要構造	－	基本構造に変更はないため，反映は不要
	排気筒	・補助柱を追設 ・主柱リブ補強 ・鉄塔脚部補強		①解析手法	－	新たな解析手法を用いないため，反映は不要
				②許容限界	－	新たな許容限界を用いないため，反映は不要
				③主要構造	－	主要構造としての記載なし
機器・配管系	原子炉格納容器	スタビライザ	・フランジボルトの材質変更	①解析手法	－	新たな解析手法を用いないため，反映は不要
				②許容限界	－	新たな許容限界を用いないため，反映は不要
				③主要構造	－	基本構造に変更はないため，反映は不要
		電気配線貫通部	・支持構造物を追設	①解析手法	－	新たな解析手法を用いないため，反映は不要
				②許容限界	－	新たな許容限界を用いないため，反映は不要
				③主要構造	－	基本構造に変更はないため，反映は不要
	残留熱除去系熱交換器	・熱交換器の下部胴板に支持構造物を追設		①解析手法	－	新たな解析手法を用いないため，反映は不要
				②許容限界	－	新たな許容限界を用いないため，反映は不要
				③主要構造	－	主要構造としての記載なし
	原子炉補機冷却系熱交換器	・熱交換器脚部の支持構造物に補強部材を追設		①解析手法	－	新たな解析手法を用いないため，反映は不要
				②許容限界	－	新たな許容限界を用いないため，反映は不要
				③主要構造	－	主要構造としての記載なし
	制御棒駆動水圧系水圧制御ユニット	・架構部に補強部材を追設		①解析手法	－	新たな解析手法を用いないため，反映は不要
				②許容限界	－	新たな許容限界を用いないため，反映は不要
				③主要構造	－	主要構造としての記載なし

	施設・設備名称	構造変更の概要		設計方針等への反映の要否		
				項目	要否	備考
機器・配管系	原子炉補機海水ポンプ	・長尺化 ・支持構造物の追設および位置変更		①解析手法	－	新たな解析手法を用いないため，反映は不要
				②許容限界	－	新たな許容限界を用いないため，反映は不要
				③主要構造	－	主要構造としての記載なし
	高圧炉心スプレイ補機海水ポンプ	・長尺化 ・支持構造物の追設		①解析手法	－	新たな解析手法を用いないため，反映は不要
				②許容限界	－	新たな許容限界を用いないため，反映は不要
				③主要構造	－	主要構造としての記載なし
	圧力低減設備	ダウンカマ	・補強リブを追設	①解析手法	－	新たな解析手法を用いないため，反映は不要
				②許容限界	－	新たな許容限界を用いないため，反映は不要
				③主要構造	－	基本構造に変更はないため，反映は不要
		ベントヘッダ	・支持構造物の取替	①解析手法	－	新たな解析手法を用いないため，反映は不要
				②許容限界	－	新たな許容限界を用いないため，反映は不要
				③主要構造	－	基本構造に変更はないため，反映は不要
		ベント管	・補強リブを追設	①解析手法	－	新たな解析手法を用いないため，反映は不要
				②許容限界	－	新たな許容限界を用いないため，反映は不要
				③主要構造	－	基本構造に変更はないため，反映は不要
	燃料取替機	・トロリ補強 ・ブリッジおよびトロリ脱線防止ラグ補強 ・走行レール交換		①解析手法	－	新たな解析手法を用いないため，反映は不要
				②許容限界	－	新たな許容限界を用いないため，反映は不要
				③主要構造	－	主要構造としての記載なし

	施設・設備名称	構造変更の概要	設計方針等への反映の要否		
			項目	要否	備考
機器・配管系	原子炉建物天井クレーン	・落下防止ラグおよびトロリストッパの形状変更	①解析手法	○	解析手法として非線形時刻歴応答解析を使用することを「第４条：地震による損傷の防止 第１部 1.基本方針 1.2　追加要求事項に対する適合性 (2) 安全設計　1.4 耐震設計 1.4.1 設計基準対象施設の耐震設計 1.4.1.3 地震力の算定方法 (2) 動的地震力」に 反映済
			②許容限界	－	新たな許容限界を用いないため，反映は不要
			③主要構造	－	主要構造としての記載なし
	配管系	・配管の追設	①解析手法	－	新たな解析手法を用いないため，反映は不要
			②許容限界	－	新たな許容限界を用いないため，反映は不要
			③主要構造	－	基本構造に変更はないため，反映は不要
		・サポートの追設および強化	①解析手法	－	新たな解析手法を用いないため，反映は不要
			②許容限界	－	新たな許容限界を用いないため，反映は不要
			③主要構造	－	基本構造に変更はないため，反映は不要

	施設・設備名称	構造変更の概要	設計方針等への反映の要否		
			項目	要否	備考
屋外重要土木構造物	取水槽	・スクリーン室に後施工せん断補強鉄筋を追設	①解析手法	○	解析手法として３次元ＦＥＭモデルによる静的非線形解析を使用することを「第４条：地震による損傷の防止 第１部 1.基本方針 1.2　追加要求事項に対する適合性 (2) 安全設計　1.4 耐震設計 1.4.1 設計基準対象施設の耐震設計 1.4.1.4 荷重の組合せと許容限界 (4)許容限界」に 反映済
			②許容限界	－	新たな許容限界を用いないため，反映は不要
			③主要構造	－	主要構造としての記載なし

別紙－13

島根原子力発電所２号炉

後施工せん断補強筋による耐震補強

目次

頁

1. 概要 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 1
2. PHb 工法について ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 1
2.1 PHb 工法の使用部位 ・・・・・・・・・・・・・・・・・ 1
2.2 PHb 工法の概要 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 2
3. 建設技術審査証明報告書の概要 ・・・・・・・・・・・・ 3
3.1 PHb 工法の建設技術審査証明報告書の位置付け ・・・・ 3
3.2 建設技術審査証明報告書における PHb 工法の適用範囲 ・ 4
3.3 建設技術審査証明報告書における PHb 工法の設計方法 ・ 5
3.4 建設技術審査証明報告書における施工性の確認 ・・・ 21
4. 島根原子力発電所２号炉における PHb の適用性確認 ・・ 24
4.1 方針 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 24
4.2 耐震評価に基づく補強仕様の設定 ・・・・・・・・・・ 26
4.3 適用性確認項目の抽出 ・・・・・・・・・・・・・・・ 27
4.4 建設技術審査証明報告書の適用範囲の確認 ・・・・・ 29
4.5 せん断補強効果の確認 ・・・・・・・・・・・・・・・ 33
4.6 施工実績・研究事例等の確認 ・・・・・・・・・・・・ 39
4.7 PHb の施工上の確認 ・・・・・・・・・・・・・・・・ 55
4.8 PHb の適用性確認結果 ・・・・・・・・・・・・・・・ 59

添付資料

（添付資料１） 建設技術審査証明書
（添付資料２） 解析によるせん断補強効果の確認について
（添付資料３） 「施工管理要領書（案）（取水槽耐震補強工事（ポストヘッドバー工法））」
（添付資料４） 建設技術審査証明報告書の実験条件を超えるせん断スパン比に対する PHb の適用性について

1.　概要

取水槽については，せん断耐力の向上を目的に耐震補強を行う。取水槽は地中構造物であり，片側からしか施工できない制限を有することから，後施工プレート定着型せん断補強鉄筋（Post-Head-bar）（以下「PHb」という）工法を採用する。

本資料は，島根原子力発電所２号炉取水槽特有の各種条件に対して，PHb 工法が適用性を有するか確認するものである。

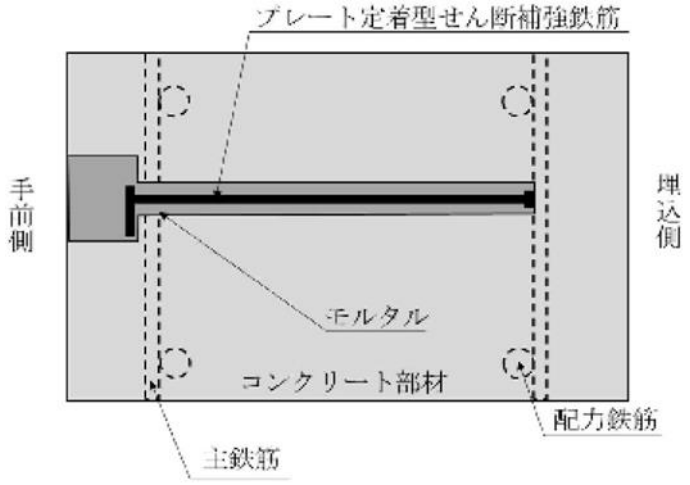
2.　PHb 工法について

2.1　PHb 工法の使用部位

取水槽において，基準地震動発生時に屋外重要土木構造物としての機能（耐震安全上重要な機器・配管系の間接支持機能，若しくは非常時における海水の通水機能）を維持するためにせん断耐力を確保する必要がある。せん断耐力を向上させるためには躯体のせん断補強を実施する必要があり，部材増し厚等のせん断補強が困難な部材に対して「後施工」によるせん断補強鉄筋を追加する PHb 工法を用いる。PHb 工法は，取水槽スクリーン室の隔壁のせん断補強に用いる。

2.2　PHb 工法の概要

1980 年以前の土木学会コンクリート標準示方書に従って設計した構造物はせん断補強鉄筋量が相当に少なく設計されていることから，現在の耐震設計法において部材のせん断耐力が不足することが想定される。そのような供用中の鉄筋コンクリート構造物にせん断補強を行うための工法が PHb 工法である。既存構造物の表面からドリルで削孔を行い，その孔内にプレート定着型せん断補強鉄筋を差込み，充てん材で固定することにより，構造躯体と一体化をはかり，部材のせん断耐力を向上させる（第 13－2－1 図参照)。



第 13－2－1 図　PHb 工法の模式図

3. 建設技術審査証明報告書の概要

3.1 PHb 工法の建設技術審査証明報告書の位置付け

取水槽のせん断補強が必要な各構造部材に設置予定の PHb については,『建設技術審査証明報告書　技術名称　後施工プレート定着型せん断補強鉄筋「Post-Head-bar」[1)]』(以下「建設技術審査証明報告書」という）に適用範囲及び設計方法が示されている。

本工法は，高度な技術を有する第三者機関である一般財団法人土木研究センター（以下「PWRC」※1 という）により，試験データを用いて，PHb が受け持つせん断耐力の算定方法において，PHb の規格降伏強度を使用して求めた値に対し，適用部材の軸方向鉄筋間隔及び PHb の埋込側の必要定着長から評価される有効係数を乗じたものとして評価できることが確認された。ただし，有効係数の上限値は 0.9 としている。なお，建設技術審査証明報告書では，片側からしか補強施工できない部材について，PHb を設置する手順を設定し，この工事に必要な施工要素（補強設計に基づく PHb の配置，PHb 配置位置での削孔方法，削孔内への PHb の固定方法，PHb 設置後の仕上げ等の施工性）を確認しており，それぞれの要素に対しての施工性に関しても審査対象となっている。

また，建設技術審査証明報告書では,「設計・施工マニュアル」が添付され，材料及び施工に関する事項が示されている。

※1　PWRC は,国土交通大臣認可の公益法人として国土建設技術の発展向上に寄与することを目的に設立された公益法人組織であり，土木に関して，河川，道路，土質・地盤，施工，橋梁等，幅広い分野にまたがる研究開発と調査研究の受託，さらに開発された技術の普及及び技術支援に取り組んでいる。PWRC は，建設技術審査証明事業を行っており，当該審査証明技術について学識経験者及び当センターの専門技術者による「審査証明委員会」を設け，開発の趣旨，開発目標及び技術内容，既存の技術との対比，実績等について審査を行っており，高度な技術を有し，十分な信頼性を有した第三者機関である。

【参考文献】

1）一般財団法人土木研究センター：建設技術審査証明報告書　土木系材料・製品・技術、道路保全技術（建技審証第 0522 号）　後施工プレート定着型せん断補強鉄筋「Post-Head-bar」

3.2　建設技術審査証明報告書における PHb 工法の適用範囲

本工法は，地震時の変形量が限定される地中構造物など，背面に地盤などがあり片側からしか施工できない制限を有する既設コンクリート構造物に対しても，後施工によるせん断補強の目的で用いることができる。審査証明において，PHb が受け持つせん断耐力は，鉄筋の材質（SD295，SD345，SD390），径（D13～32）ごとに定め，その値は，先施工によるせん断補強鉄筋のせん断耐力の最大 0.9 倍で評価可能としている。また，せき，水門，橋台や橋脚等の既設の半地下及び地上構造物に適用する場合には，地中構造物の場合と同様にせん断補強の目的で用いるものとし，現状で曲げ破壊モードにある構造物の変形性能に寄与する補強後のせん断補強筋量の上限を定めて求めた部材の骨格曲線の範囲内にあることが必要となる。

3.3　建設技術審査証明報告書における PHb 工法の設計方法

(1)　後施工によるせん断耐力

本工法では実験により性能を確かめることで,設計方法等を設定しており，その概要を次にまとめた。

a.実験方法

本工法を用いた設計で PHb のせん断耐力への寄与分を確認するために,梁試験体の正負交番繰返し静的加力試験(せん断破壊モード試験体)を実施することにより PHb を用いて補強することによるせん断耐力の向上の確認が行われている。

試験に用いられた試験体の諸元一覧を第 13－3－1 表に示す。

シリーズ１では，せん断補強筋のない梁試験体（CASE１）及び異なる量の PHb によりせん断補強を行った梁試験体（CASE２，３）に対して正負交番繰返し加力試験を行った。

シリーズ２では，シリーズ１の CASE２と同じ補強条件の試験体（CASE４），CASE４の PHb 先端の埋込み深さを埋込側の主鉄筋前面から５mm 手前に留めた試験体（CASE５），CASE５の PHb の鉄筋量を 1.5 倍（３列補強）とした試験体（CASE６）に対して，各々交番繰返し加力試験を行った。

シリーズ３では，PHb を配置しない梁試験体１体（CASE３－１），太径（D29・SD345）の PHb を設置した梁試験体２体（CASE３－２，CASE３－３），せん断スパン比が小さい梁試験体１体（CASE３－４），及び PHb を千鳥配置した試験体（CASE３－５）に対して正負交番繰返し加力試験を行った。

シリーズ４では，高強度（D25・SD390）の PHb を設置した梁試験体（CASE４－１）に対して，正負交番繰返し加力試験を行った。シリーズ３と４では，PHb の径及び強度以外の配筋条件は同じである。

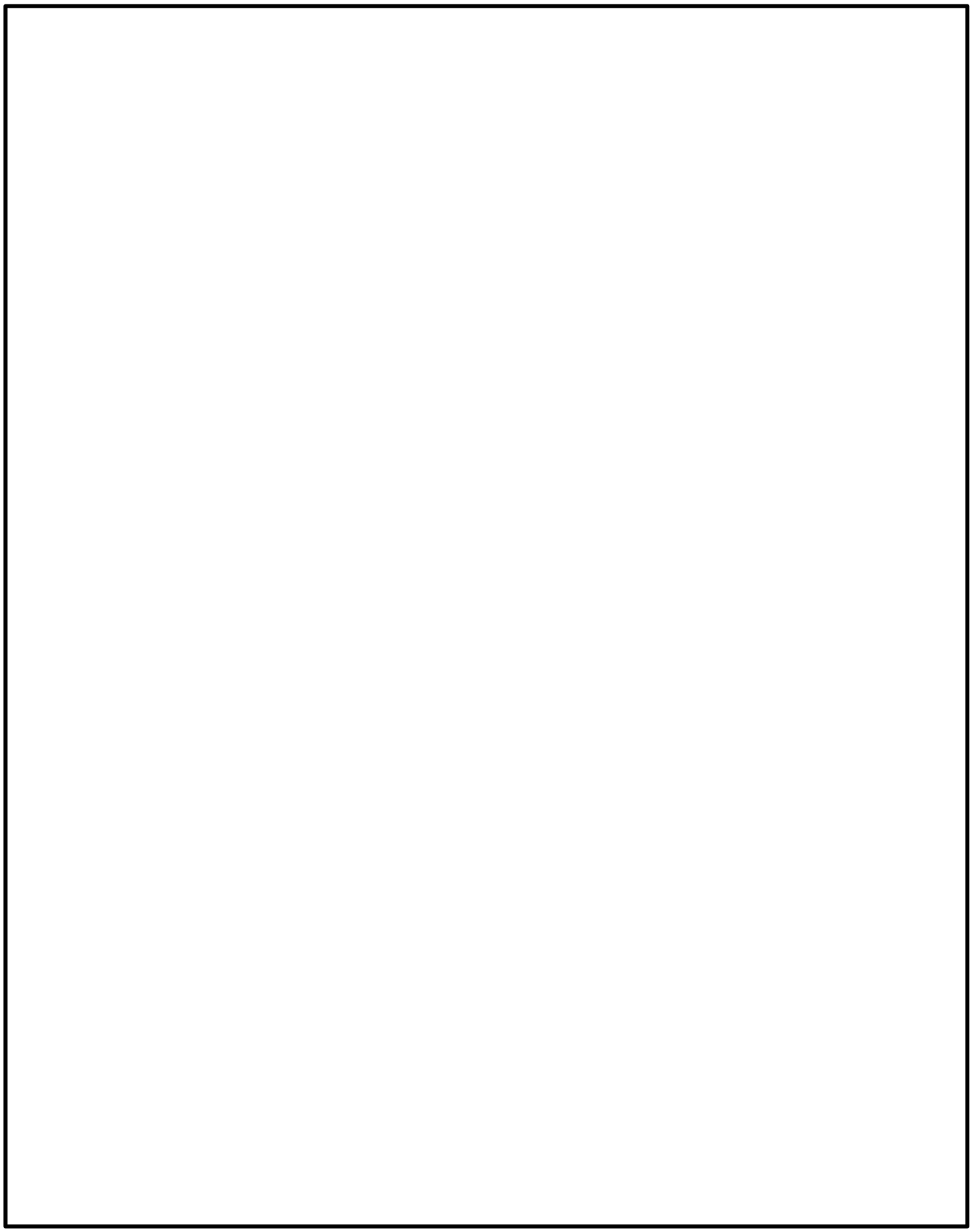
試験体及び補強方法を第 13－3－1 図に，加力要領を第 13－3－2 図に示す。

第 13－3－1 表　各ケースの試験体の諸元
（建設技術審査証明報告書より抜粋）

本資料のうち，枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

第 13－3－1 図　せん断耐力向上性能試験体の種類と補強方法
（建設技術審査証明報告書より抜粋）

本資料のうち，枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。



第 13－3－2 図　せん断耐力向上性能試験の加力要領
（建設技術審査証明報告書より抜粋）

本資料のうち，枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

b.実験結果

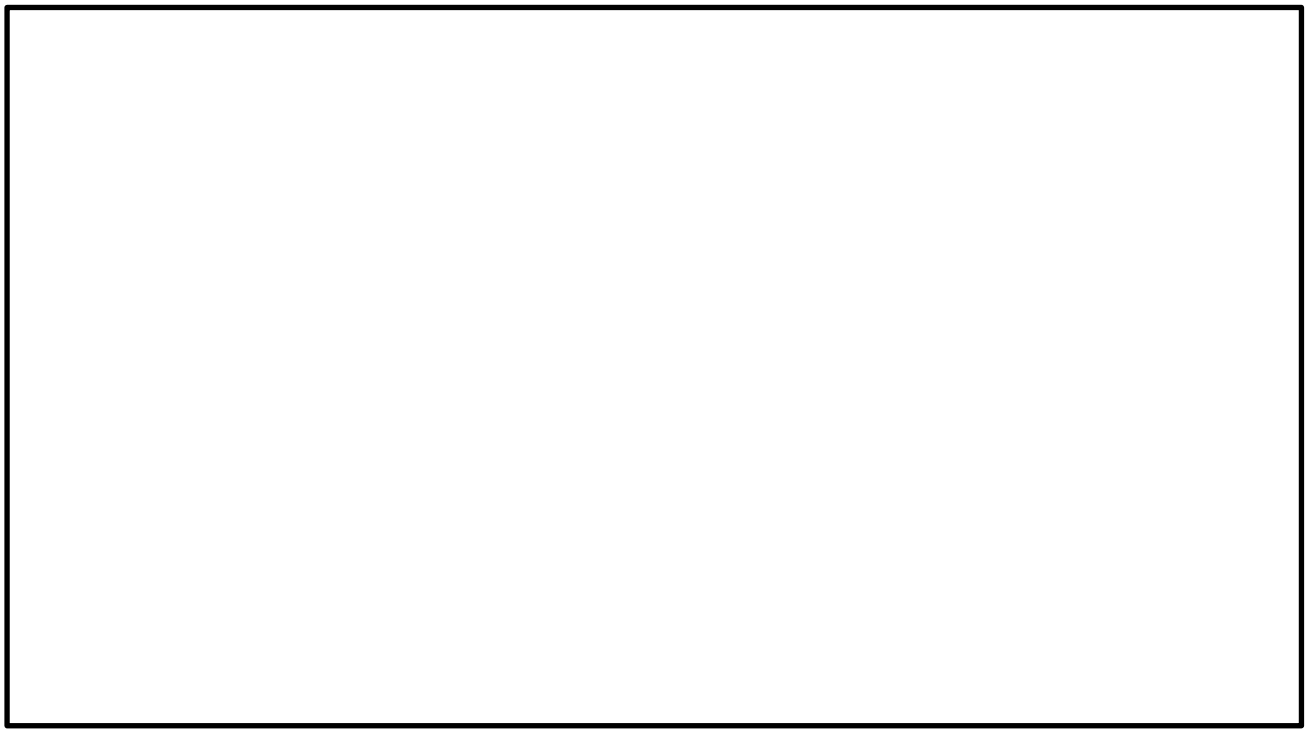
a.の試験結果を第 13－3－2 表に示す。PHb の有効係数は，PHb を通常のせん断補強鉄筋とみなして求められるせん断耐力 Vs に対して PHb が分担できるせん断耐力の比率である。有効係数の算定において，コンクリートの分担するせん断力 Vc はコンクリート標準示方書（安全係数 1.0）に基づく場合と，実験での斜めひび割れ発生時のせん断力を用いた場合について算定した。CASE２については，載荷装置の制御が不十分で大変位時に偏荷重が作用した実験条件上の理由により，検討ケースから除外した。これは，本来は２点の載荷点に均等に荷重がかかることで実験せん断耐力を(左右の合計荷重）／２より算出していたが，CASE２については，左右で作用荷重が異なっていたため,他の実験データと比較することが不適切と判断したことによる。

第 13－3－2 表　実験結果の一覧
（建設技術審査証明報告書より抜粋）

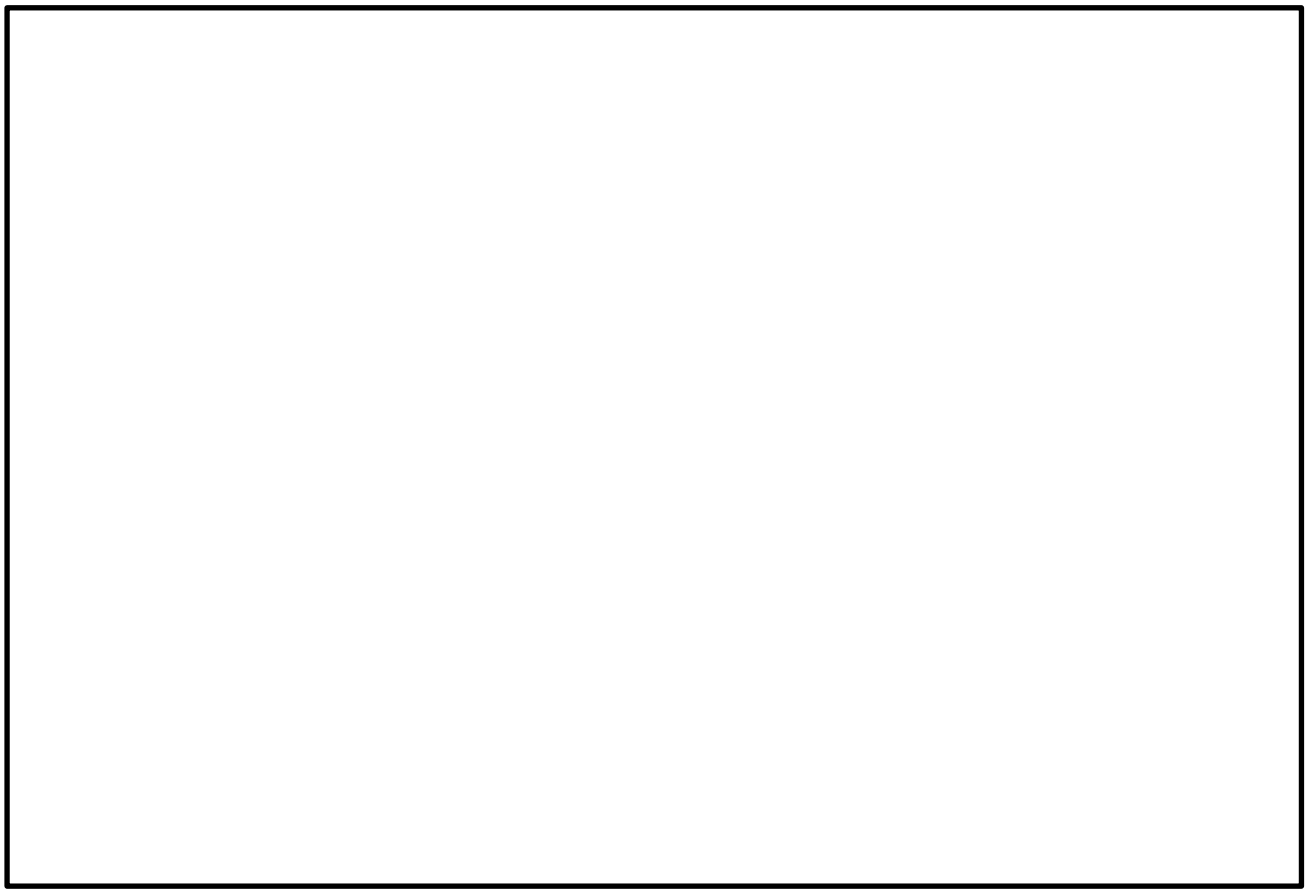
本資料のうち，枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

c.PHb のせん断補強の考え方

本資料のうち，枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。



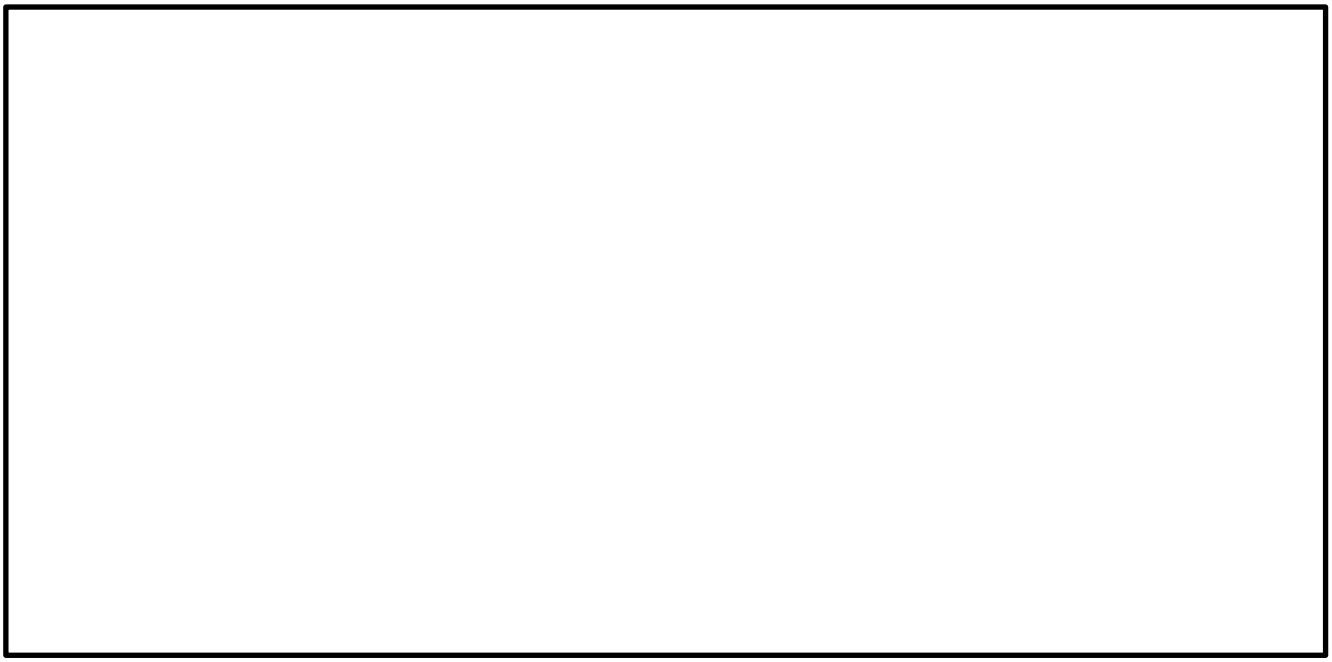
第 13－3－3 図　斜めひび割れ内の破断したせん断補強鉄筋応力
（建設技術審査証明報告書より抜粋）



本資料のうち，枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

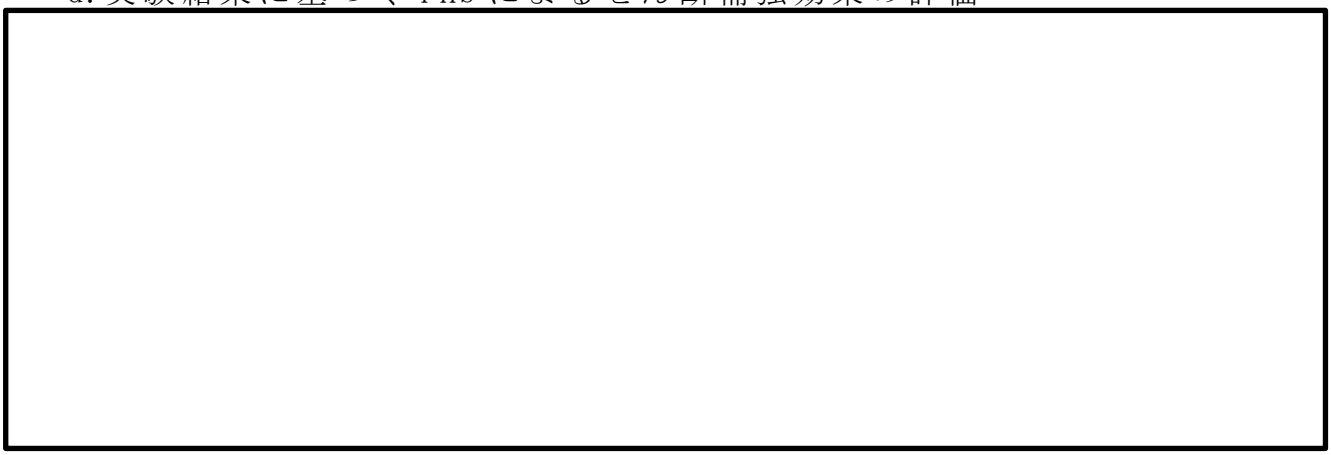


第 13－3－4 図　斜めひび割れ内の後施工せん断補強鉄筋応力
（建設技術審査証明報告書より抜粋）

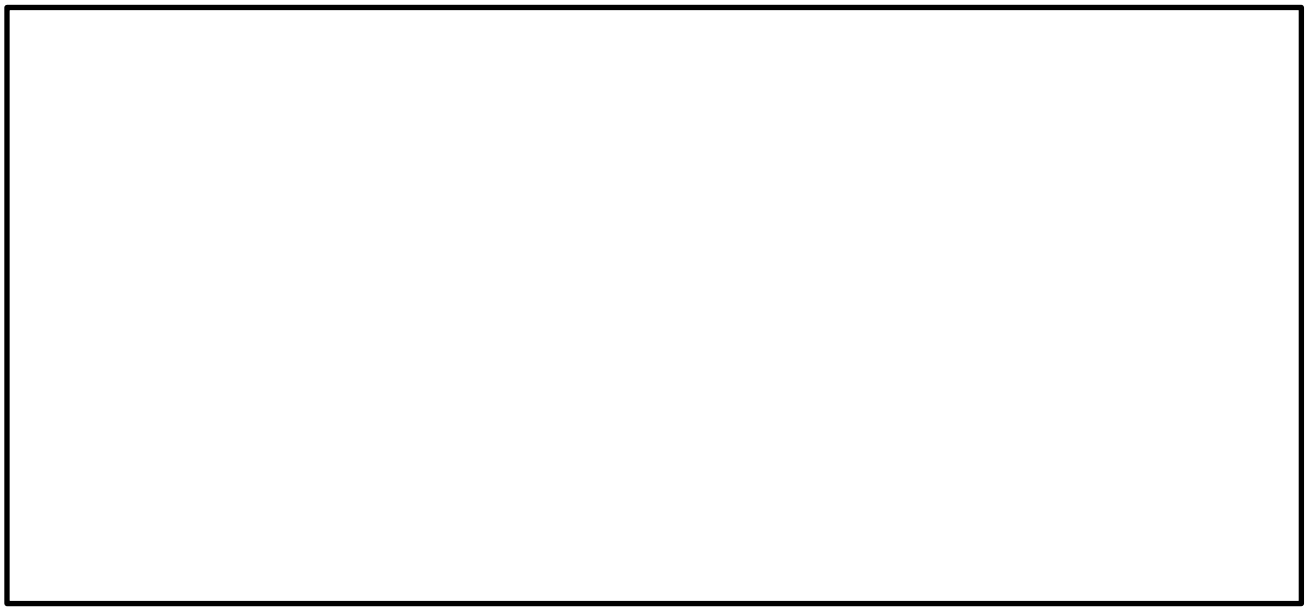


第 13－3－5 図　PHb と寸切り鉄筋の有効係数の比較

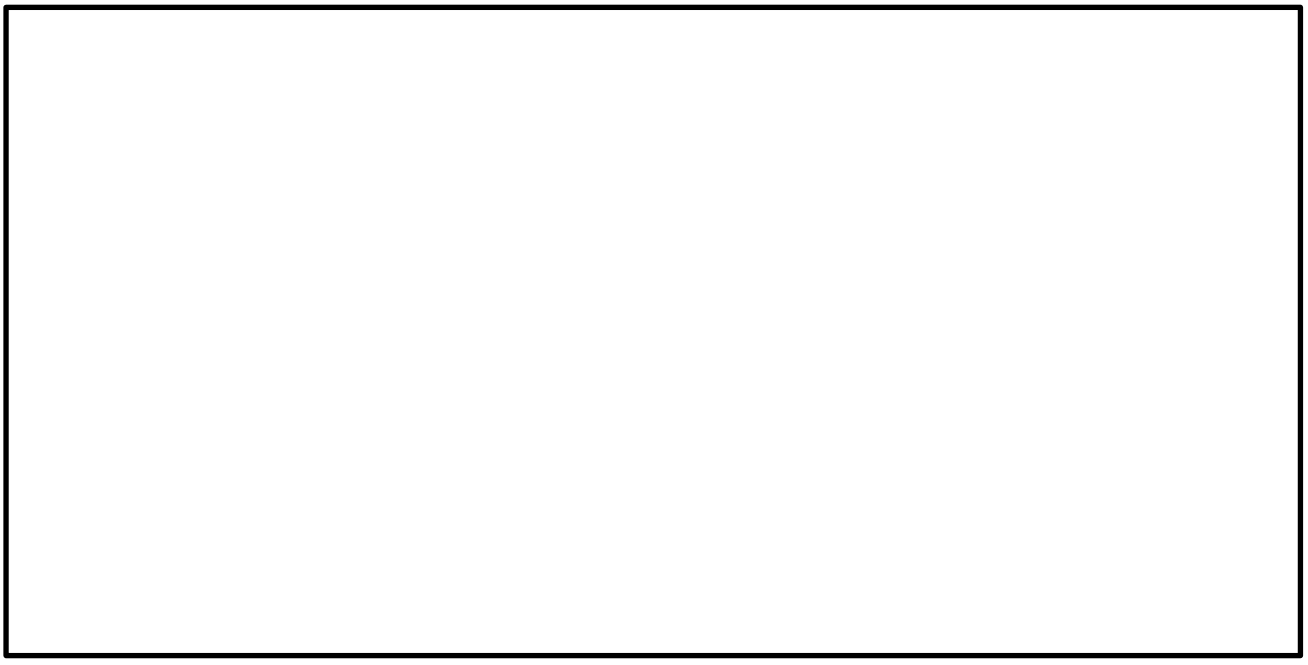
d. 実験結果に基づく PHb によるせん断補強効果の評価



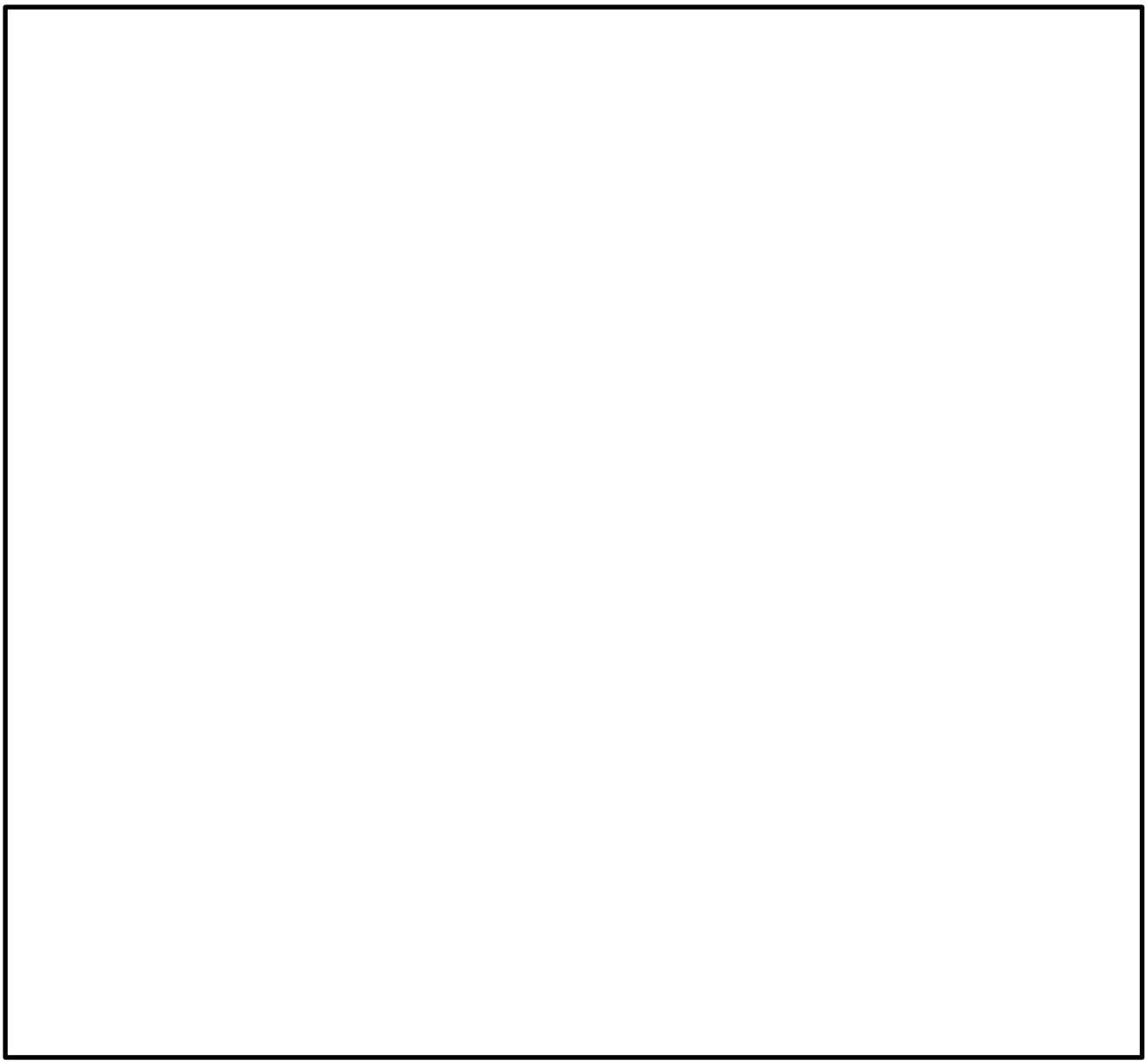
本資料のうち，枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。



第 13－3－3 表　PHb の有効係数の比較
（建設技術審査証明報告書より抜粋）



本資料のうち，枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。



第 13－3－6 図　圧縮鉄筋と引張鉄筋との間隔と有効係数の関係
（建設技術審査証明報告書より抜粋）

本資料のうち，枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

(2)使用材料・許容応力度・強度

実験を元にした本設計法では，第 13－3－7～9 図に示すとおり使用材料を定めている。今回の設計でも，これらに適合する使用材料・許容応力度・強度を用いて設計する。



第 13－3－7 図　使用材料・許容応力度・強度
（建設技術審査証明報告書より抜粋）

本資料のうち，枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

第 13－3－8 図　使用材料・許容応力度・強度
（建設技術審査証明報告書より抜粋）

本資料のうち，枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

第 13－3－9 図　使用材料・許容応力度・強度
（建設技術審査証明報告書より抜粋）

本資料のうち，枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

(3)構造部材の評価

(1)で示した基本的考え方に基づき，第 13－3－10 図で示す，コンクリート標準示方書の考え方を準用した設計式を用いてせん断耐力を定めている。

第 13－3－10 図　使用材料・許容応力度・強度
（建設技術審査証明報告書より抜粋）

本資料のうち，枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

(4)構造細目

本設計方法では，想定外の破壊形式をとらない様に，第 13－3－11 図で示す構造細目を定めている。

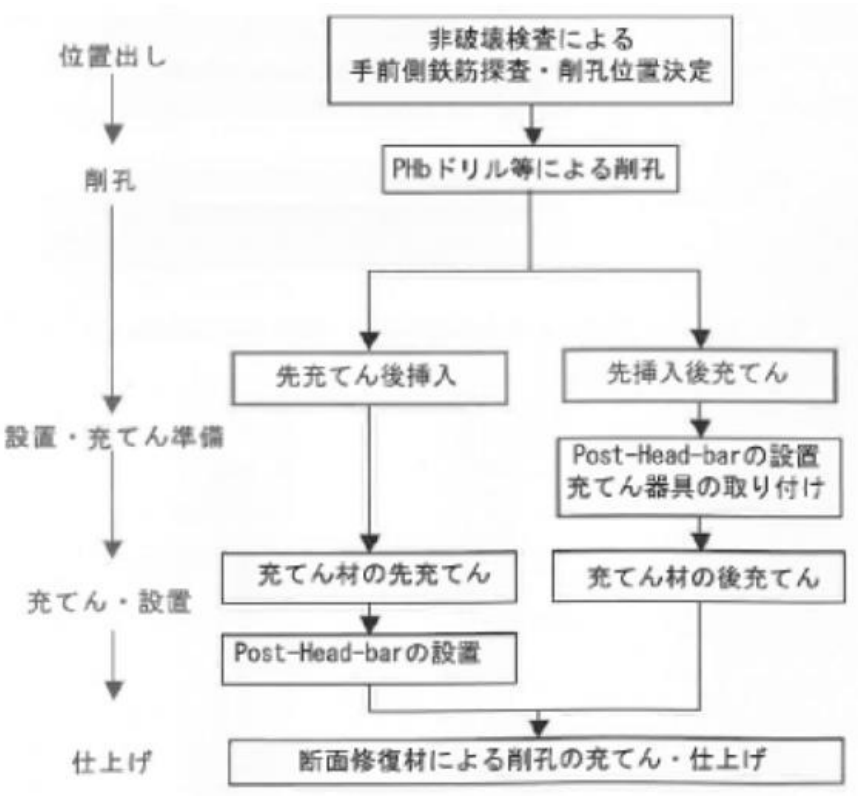


第 13－3－11 図　構造細目（建設技術審査証明報告書より抜粋）

本資料のうち，枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

3.4　建設技術審査証明報告書における施工性の確認

建設技術審査証明報告書では，施工性に関して，片側からしか補強施工できない部材に対してもせん断補強できることを，試験施工等に基づき確認している。確認に当たっては，第 13－3－12 図に示すとおり PHb を設置する手順を設定し，この工事に必要な施工要素に対して施工性を確認している。各施工要素に対する施工性の確認内容について，概要を下記に示す。



第 13－3－12 図　PHb の施工手順

(1)補強設計に基づく PHb の配置

PHb を差し込むためには，補強対象部材の手前側に設置されている主鉄筋・配力鉄筋を避けた場所に削孔位置を定める必要がある。たとえば，電磁波レーダ法を使用すれば，部材手前側の配筋の探査は容易であるので，当該主鉄筋，配力鉄筋を避けての削孔位置の決定が可能である。

(2)PHb 配置位置での削孔方法

削孔は PHb ドリルなどにより行う。PHb ドリルによる削孔は以下のような特徴がある。

・切孔ではないので，鉄筋を切断することがない（鉄筋に当たった時点で停止可能)。
・ロッドの向きと貫入深さが作業中にわかるので，削孔方向と削孔深さの精度が確保できる。
・削孔内部が凸凹のある仕上がりとなる。高圧空気で清掃すれば異物の付着もない。
・コンプレッサによる空気圧で駆動するので，削孔部・制御部が軽量小型であり，人力による取り扱いが容易。駆動源であるコンプレッサは比較的大きいが，100m 程度以上離れた位置に設置できる。
・ロッド長を短くすれば，さらに狭い空間で施工可能である。
・削孔速度が速い。
・削孔に水を使用しない。
・削孔屑を回収することができる。
・削孔反力が小さいので，架台などの支保が軽微。
・細径及び拡幅削孔に対応した削孔ビットにより削孔が容易である。

したがって，駆動源が入らない狭い空間で，水が流せないような環境においても，最小の作業員数で，比較的軽微な仮設により（あるいは仮設なしでも）効率の良い削孔が可能である。そして，既設の鉄筋を切断することなく精度の良い位置・方向に，所定の深さに削孔が可能で，かつ削孔内を凸凹で清浄に仕上げられる。すなわち，施工性と PHb を定着固定する性能の双方の観点から PHb ドリル削孔は適した方法であると確認された。

(3)削孔内への PHb の固定方法

先充てん後挿入の場合，削孔内に先に充てん材を充てんした後に PHb を差し込むだけで，PHb の固定を完了する。削孔内面は，モルタル充てん直前に湿潤状態にするかあるいはドライアウト防止剤を散布し，充てん材が吸湿されないようにする。先充てん後挿入用の充てん材は，PHb モルタルを標準とするが，下向きの場合には PHb グラウトを使用してもよい。

PHb モルタルの可塑性によって，削孔内からモルタルがたれないので，この方法によって容易に PHb の削孔内への固定が可能であることを確認した。充てん材が PHb モルタルであれば，削孔内に設置した PHb の先端定着部までグラウトが密実に充てんされ，PHb とコンクリート躯体が，一体となっていることを確認した。

PHb モルタルはプレミックス材料であり，施工現場では，所定量の水を混ぜてハンドミキサで混合するだけで所定の性質のものが使用できる。所要のモルタル量も少量で，手押しのポンプで充てん可能であるので，最小限の設備と人員での PHb の設置が可能である。

(4)PHb 設置後の仕上げ等施工性

先充てん後挿入については，充てん材をパッカー等で抑えて養生した後に，断面修復によって削孔部分の充てん復旧を行う。
断面修復材もプレミックス品であり，施工現場において必要な量を即時に練り混ぜて作ることができる。施工も左官仕上げによるので容易である。断面修復の専用材料であるので，品質の信頼性は高い。

4. 島根原子力発電所２号炉における PHb の適用性確認

4.1 方針

PHb 工法は建設技術審査証明報告書により後施工せん断補強方法としての有効性が証明されており，また，これまでに数多くの施工実績がある。PHb 工法を島根原子力発電所２号炉の取水槽に適用するに当たり，建設技術審査証明報告書の適用範囲やせん断補強効果等についての確認を行い，島根原子力発電所２号炉の構造形式・諸元，地盤条件，使用環境，補強内容等が適用範囲に該当することを確認する。適用性の確認は，先行サイトとの類似点及び相違点を整理したうえで行う。確認フローを第 13－4－1 図に示す。

① 適用性確認項目の抽出

後施工によるせん断補強において，せん断補強効果に影響を与えると考えられる項目を抽出する。その際，建設技術審査証明報告書に記載されている審査証明の範囲及び各種実験等から適用性確認項目を抽出する。

② 建設技術審査証明報告書の適用範囲に収まっているか

島根原子力発電所２号炉の構造物に採用する補強仕様が PHb 工法の建設技術審査証明報告書において規定されている適用範囲に収まっているかの確認をする。収まっていない場合は適用範囲内に収まる補強仕様になるように再設計を実施する。

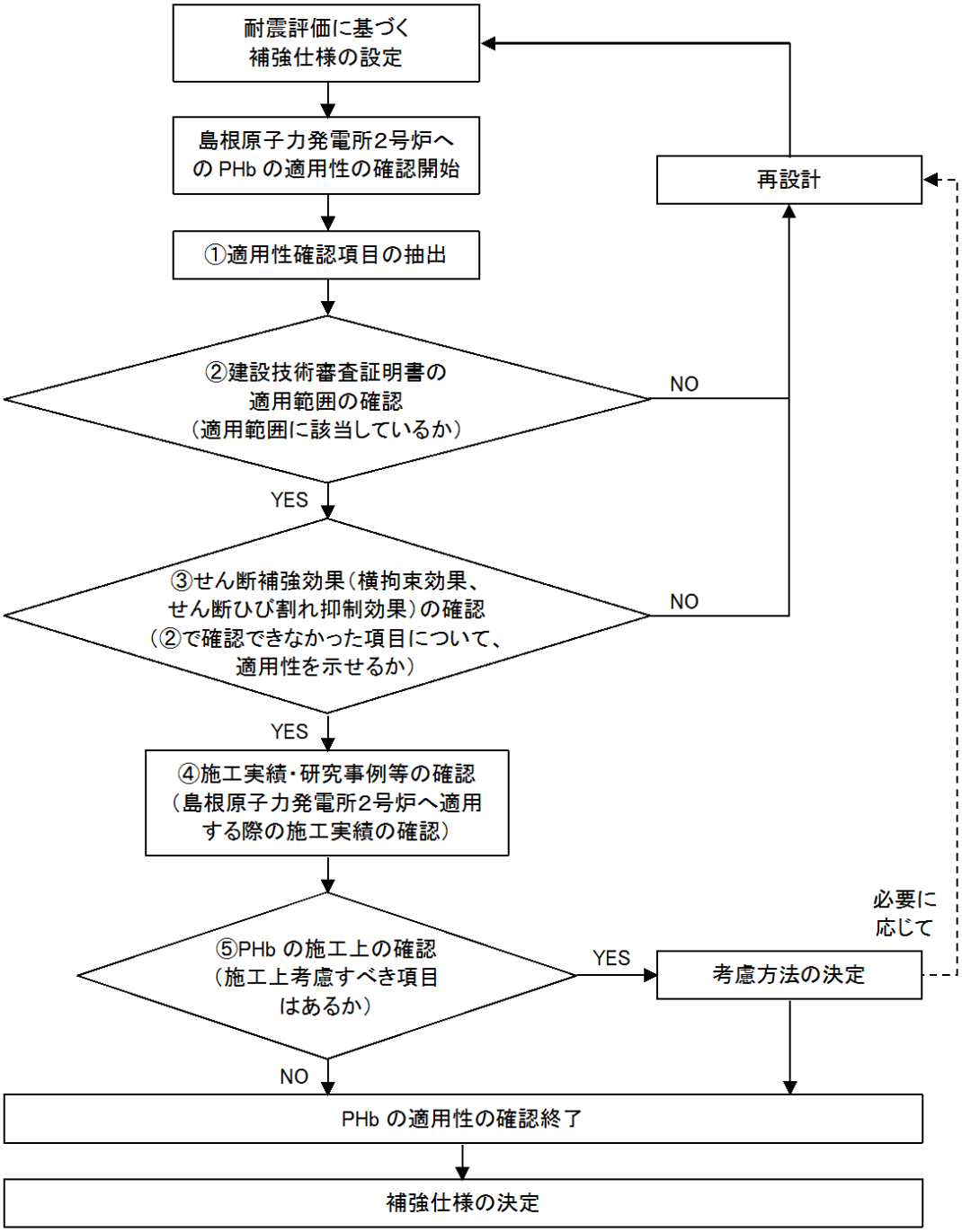
③ 補強仕様に対して②以外の項目においてもせん断補強効果を期待できるか

①で挙げた適用性確認項目のうち②で確認できていない項目について，適用性の確認を実施する。適用性確認の際は，せん断補強効果が期待できるかという点について検討を実施する。

④ 後施工せん断補強鉄筋に関する施工実績・研究事例について，目的，試験体諸元等を整理し，島根原子力発電所２号炉への適用において考慮・反映すべき事項を検討する。

⑤ PHb の施工において考慮すべき項目はあるか

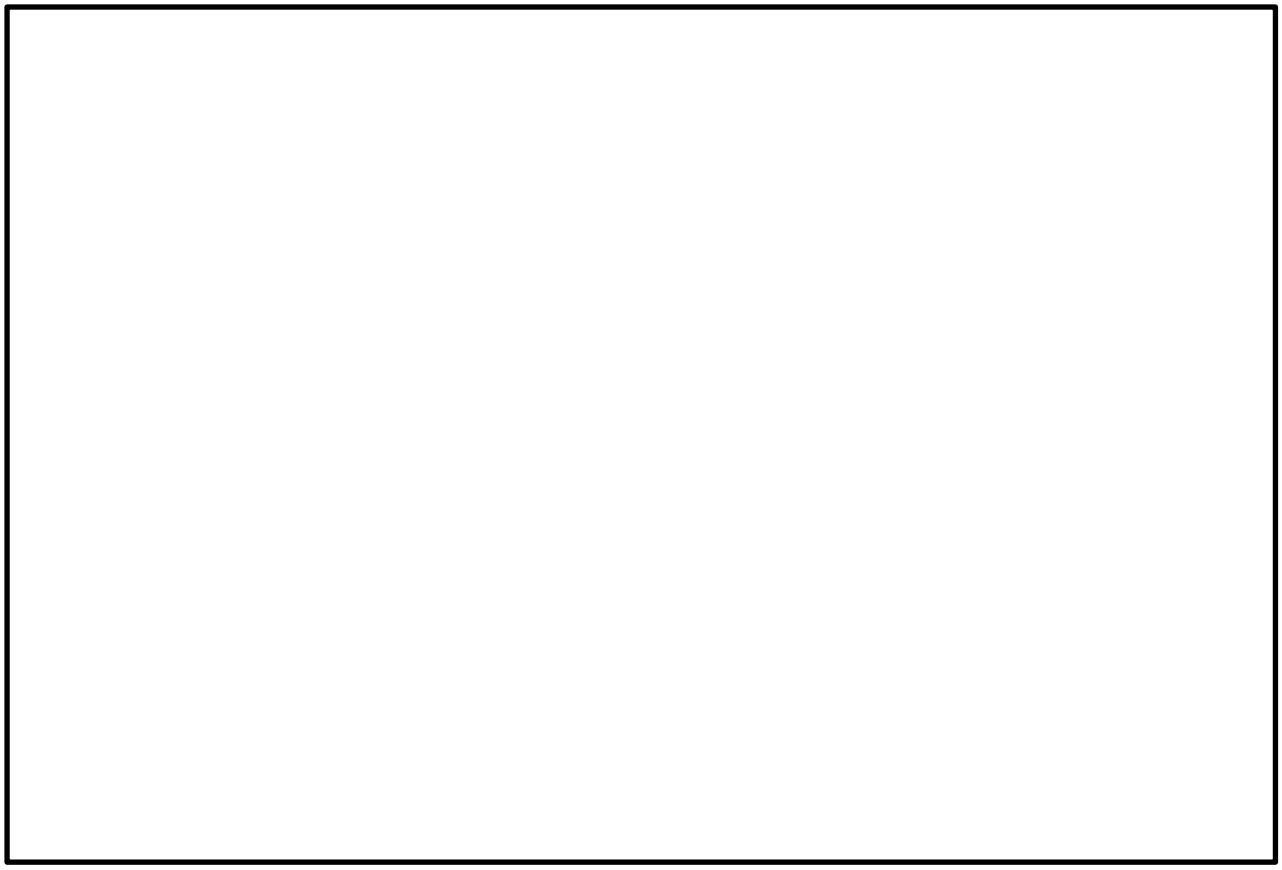
島根原子力発電所２号炉の屋外重要土木構造物に対して PHb 工法の施工をする際に，考慮しておくべき事項がないか確認を行う。ある場合は施工上または設計上どのように考慮するかを決定したうえで考慮方法によっては再設計を実施するか適宜判断を行う。



第 13－4－1 図　確認フロー図

4.2　耐震評価に基づく補強仕様の設定

耐震安全性評価を実施し，各部材において不足するせん断耐力を満足するように設定した結果，第 13－4－2 図のような補強仕様となった。



第 13－4－2 図　補強仕様

本資料のうち，枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

4.3　適用性確認項目の抽出

PHb 工法の特徴及び島根原子力発電所２号炉固有の条件等の観点から，適用性を確認するために必要な検討項目を抽出する。以下に確認項目を挙げる。

a．使用目的

適用の前提として，審査証明の範囲として明記されている目的に該当している必要がある。

b．構造形式

適用の前提として，審査証明において想定している構造形式に該当している必要がある。

c．構造細目

PHb 工法では，想定外の破壊形式をとらない様に審査証明において規定している構造細目に該当している必要がある。

d．部材諸元

部材厚については，建設技術審査証明報告書内の実験で適用性が確認された部材あるいは実績のある部材厚であることを確認する。

せん断スパン比，主鉄筋比，コンクリート設計基準強度については，応力伝達の観点から建設技術審査証明報告書内の実験で適用性が確認された範囲内であること，又は，範囲内でなくともせん断補強効果が期待できるかを確認する。

e．使用材料（せん断補強鉄筋）

PHb に使用する鉄筋の種別・径に応じて必要な定着長が設定されているため，島根原子力発電所２号炉の土木構造物の補強では適用性が確認された補強鉄筋を用いる必要がある。

f．使用材料（プレート）

審査証明において確認されている材料を用いる必要がある。

g．使用材料（充てん材）

応力伝達の観点から，構造体コンクリートと同等である必要がある。

h．使用材料（断面修復材）

応力伝達の観点から，構造体コンクリートと同等である必要がある。

i．載荷方法

応力伝達の観点から建設技術審査証明報告書内の実験で適用性が確認された範囲内であること，又は，範囲内でなくともせん断補強効果が期待できるかを確認する。

j．せん断補強筋の定着長

適用の前提として審査証明において設定している定着長を考慮して設計している必要がある。

k．せん断ひび割れ抑制効果

材料非線形解析を実施して，特異なひび割れが発生していないか確認する。

l．応力状態（損傷程度）

PHb の構造の特徴として，両端の定着プレートが有効に機能する必要があり，そのために構造物がおおむね弾性範囲内であることを確認する。

m．変形量（横拘束効果の確認）

PHb の適用範囲として「地震時の変形量が限定される地中構造物等」とされている。変形に関しては，変形に伴う曲げひび割れの影響が考えられるが，変形量に関する定量的な影響検討は行われていないため，変形量に対しては，適用確認実験の変形量を超えない必要があると考えられる。

n．使用環境

島根原子力発電所２号炉固有の使用環境として，取水槽は海水に接することが挙げられることから海水環境下での実績があることを確認する。

4.4　建設技術審査証明報告書の適用範囲の確認

PHb の適用について，建設技術審査証明報告書に記載の，a.使用目的，c.構造細目，e～h.使用材料及び j.せん断補強筋の定着長の確認結果を下記に示す。

a.使用目的

使用目的は，先行サイト（美浜 3 号炉及び東海第二）と同様，第 13－4－1 表に示すとおり，審査証明の範囲として明記されている目的に該当していることを確認した。

第 13－4－1 表　PHb の適用範囲と適用条件（使用目的）

建設技術審査証明報告書の適用範囲	使用箇所及び状況
	地中構造物であり，片側からしか施工できない制限を有する既設コンクリート構造物に対して，後施工によるせん断補強の目的で用いる。
	地中構造物に適用し，せん断補強の目的で用いる。(変形性能(じん性)の向上を目的として用いているわけではないため，左記に示す変形性能に寄与する補強後のせん断補強鉄筋量の上限値の規定については不問である。)

本資料のうち，枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

c.構造細目

構造細目は，先行サイトと同様，第 13－4－2 表に示すとおり，審査証明において規定している構造細目に該当していることを確認した。

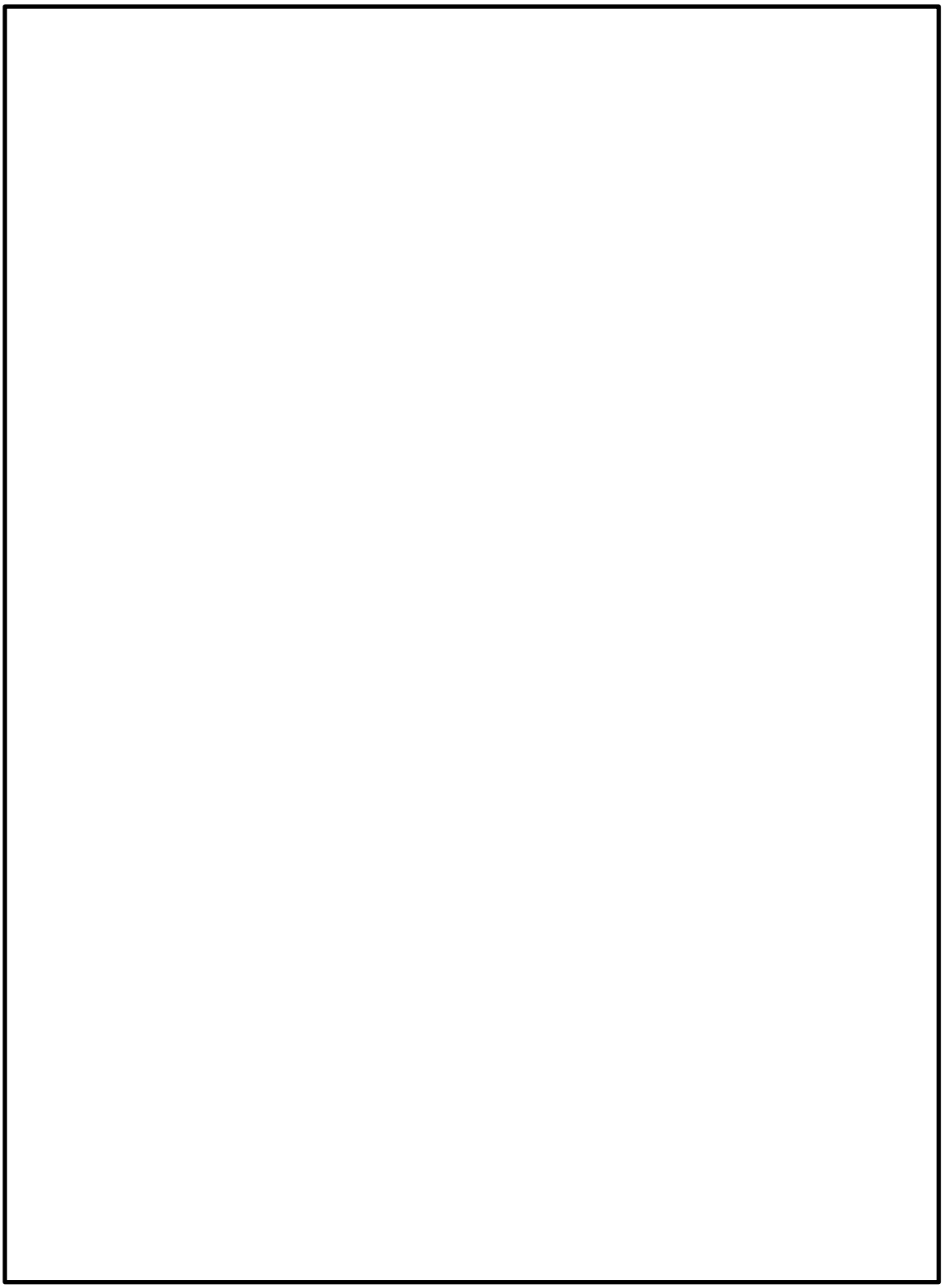
第 13－4－2 表の構造細目②においては，収縮ひび割れに対する用心鉄筋としての配慮であることがコンクリート標準示方書に記述されているので，収縮が収束していると考えられる部材の補強ではこの規定（せん断スパン方向の最大間隔 300mm 以下）を外すことができる。

なお，PHb の配置は第 13－4－3 図に示す標準配置によるものとする。

第 13－4－2 表　PHb の適用範囲と適用条件（構造細目）

確認項目	美浜 3 号炉 （PHb 工法）	東海第二 （PHb 工法）	島根 2 号炉 （PHb 工法）	建設技術審査証明 報告書の適用範囲
構造細目① （せん断補強鉄筋の断面積比）	0.21～0.94%	0.43%	0.51%	補強前に配置されていたスターラップと Post-Head-bar を加えたせん断補強鉄筋の断面積比が 0.15%以上。
構造細目② （PHb 配置のせん断スパン方向の最大間隔）	Post-Head-bar を配置するせん断スパン方向の最大間隔は，補強対象部材の有効高さの 1/2 倍以下で，かつ 300 ㎜以下。	Post-Head-bar を配置するせん断スパン方向の最大間隔は，補強対象部材の有効高さの 1/2 倍以下で，かつ 300 ㎜以下。	Post-Head-bar を配置するせん断スパン方向の最大間隔は，補強対象部材の有効高さの 1/2 倍以下で，かつ 300 ㎜以下。	Post-Head-bar を配置するせん断スパン方向の最大間隔は，補強対象部材の有効高さの 1/2 倍以下で，かつ 300 ㎜以下。
構造細目③ （埋込先端のかぶり）	Post-Head-bar の埋込先端は，軸方向鉄筋の位置まで配置することを原則とする。ただし，埋込先端のかぶりは，100 ㎜+主筋径の 1/2 とし，50 ㎜以上を確保している。	Post-Head-bar の埋込先端は，軸方向鉄筋の位置まで配置することを原則とする。ただし，埋込先端のかぶりは，75 ㎜+主筋径の 1/2 とし，50 ㎜以上を確保している。	Post-Head-bar の埋込先端は，軸方向鉄筋の位置まで配置することを原則とする。ただし，埋込先端のかぶりは，130 ㎜+主筋径の 1/2 とし，50 ㎜以上を確保している。	Post-Head-bar の埋込先端は，軸方向鉄筋の位置まで配置することを原則とする。ただし，埋込先端のかぶりは，必要なかぶりを確保しつつ 50 ㎜以上とする。

他サイトの情報に係る記載内容については，会合資料や HP 等をもとに弊社の責任において独自に解釈したものである。



第 13－4－3 図　PHb の標準配置
（建設技術審査証明報告書より抜粋）

本資料のうち，枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

e～h.使用材料及び j.せん断補強筋の定着長

構造細目は，先行サイトと同様，第 13－4－3 表に示すとおり，審査証明に明記されている適用範囲に合致することを確認した。

第 13－4－3 表　PHb の適用範囲及び適用条件
（使用材料及びせん断補強筋の定着長）

	建設技術審査証明報告書の材料範囲等	実使用材料
せん断補強筋		左記範囲内の材料を使用する。（D19～D32　SD345）
プレート		材質は，SM490 相当を用い，品質証明書でその品質を確認する。
充てん材		躯体コンクリート以上の強度
断面修復材		躯体コンクリート以上の強度
定着長		左記の定着長を考慮して設計を実施する。

本資料のうち，枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

4.5　せん断補強効果の確認

(1)せん断補強効果の確認内容

「4.3　適用性確認項目の抽出」で抽出した適用性確認項目のうち，建設技術審査証明報告書では確認できなかった項目についてもせん断補強効果が期待できるかを確認する。以下に確認する項目を挙げる。PHb 工法と先施工のせん断補強鉄筋とで大きく異なる部分は，PHb 工法ではコンクリートに定着をとっていることである。したがって，コンクリート部分に関する項目が主となって，せん断補強効果に影響を及ぼすと考えられる。なお，以下に示す項目については，(2)以降において，解析的にせん断補強効果が得られていることを確認する。

b.構造形式
d.部材諸元
i.載荷方法
k.せん断ひび割れ抑制効果
l.応力状態（損傷程度）
m.変形量
n.使用環境

(2)せん断補強効果の確認

b.構造形式

建設技術審査証明報告書に構造形式の具体的な記載はないが,使用目的として,「地震時の変形量が限定される地中構造物など」という記載があることから地中に埋設されたボックスカルバート構造の構造物を想定していると考えられる。

先行サイトにおいても同様の考察を行っており,島根２号炉取水槽は先行サイトと同様の構造形式であることから,島根２号炉取水槽は PHb 工法が適用可能な構造形式であると考えられる。

d.部材諸元，i.載荷方法，k.せん断ひび割れ抑制効果

PHb による補強効果については，建設技術審査証明報告書の各種実験にて検証している。建設技術審査証明報告書では，実験を上回る部材厚については，理論式により求められる有効係数β_{aw}を実験の部材厚で得られた値である 0.9 を上限として用いることで保守的な設計としている（第 13－3－10 図参照)。島根原子力発電所２号炉取水槽の部材厚は，実験で用いた部材と比べて大きいため，実験を上回る部材厚でも PHb の補強効果が期待でき適用性を有することを解析により補足する。また，部材諸元のうち，部材厚以外にもせん断スパン比，主鉄筋比，コンクリート設計基準強度及び載荷方法が島根原子力発電所２号炉取水槽で建設技術証明報告書に記載の各種実験と異なっている。したがって，先行サイトと同様，せん断ひび割れ抑制効果の確認とともに，上記の項目についても島根原子力発電所２号炉の実際の構造物の設計荷重等と同じ条件でもせん断補強効果が期待できるかの確認を解析により補足する。

解析の詳細については，添付資料２「解析によるせん断補強効果の確認について」に記載する。添付資料２「解析によるせん断補強効果の確認について」にて記載したとおり，実験条件と異なる項目においてもせん断補強効果を確認する。また，弾性挙動内においても特異なひび割れや変形が発生しないことを確認する。

・部材厚

項目	建設技術審査証明報告書（実証試験）	先行原子力発電所における審査実績（美浜３号炉）	先行原子力発電所における審査実績（東海第二）	島根２号炉取水槽の PHb 適用部材※2
部材厚	500 ㎜	2,000 ㎜（海水ポンプ室底板）	3,190 ㎜（取水ピット中頂板） 1,500 ㎜（左・右側壁） 1,200 ㎜（取水ピット底板，隔壁） 1,000 ㎜（上記以外の部材）	1,200 ㎜（取水槽スクリーン室隔壁）
実験または解析により得られた有効係数 β exp	0.90	0.92	0.97	0.96
式※1により計算した有効係数 β_{aw}	0.89	0.90（上限値）	0.90（上限値）	0.90（上限値）

【検証結果】

・島根２号炉取水槽（スクリーン室）の PHb 適用部材について，その部材厚は実証実験（500 ㎜）～審査実績（3,190 ㎜）の範囲内に収まっている。

・添付資料２の 3. ②及び 4. ③に示す材料非線形解析を用いた検証解析により，スクリーン室隔壁に対する PHb によるせん断補強効果を確認した。

以上より，島根２号炉取水槽（スクリーン室）の PHb 適用部材に対し，部材厚の観点について適用性を有すると判断した。

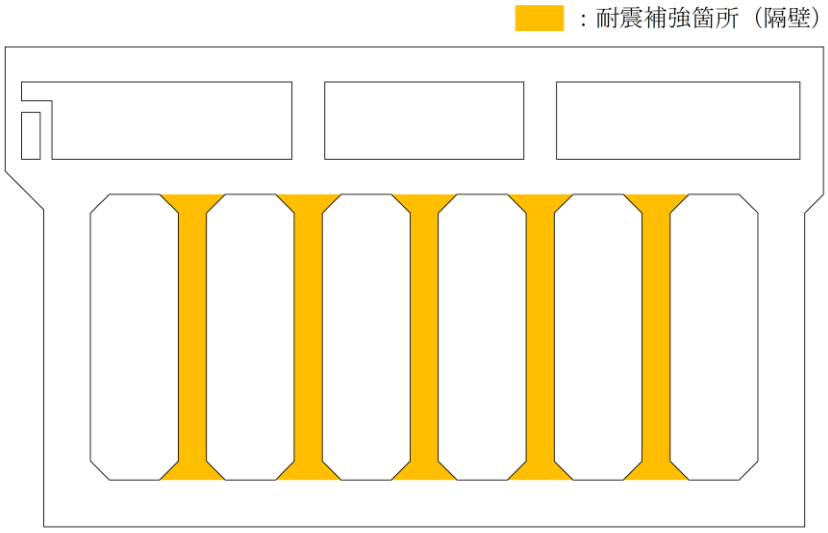
注記　※1 建設技術審査証明報告書における実証試験結果より設定された以下の設計式

$\beta_{aw}=1-l_y/\{2\cdot(d-d')\}$（ただし，$\beta_{aw}\leqq 0.9$）

l_y：後施工せん断補強筋の埋込側に必要な定着長

d-d’：補強対象部材の圧縮-引張鉄筋の間隔（$d-d'\geqq l_y$）

※2 取水槽（スクリーン室）の各部材配置を以下に示す。



・せん断スパン比※1

項目	建設技術審査証明報告書（実証試験）	先行原子力発電所における審査実績（美浜３号炉）	先行原子力発電所における審査実績（東海第二）	島根２号炉取水槽の PHb 適用部材
せん断スパン比	1.19～2.79	1.92	2.15	11.40※2

【検証結果】

・島根２号炉取水槽（スクリーン室）の PHb 適用部材のせん断スパン比は，実証試験における試験体のせん断スパン比（1.19～2.79）及び先行原子力発電所の審査実績のせん断スパン比（1.92～2.15）の範囲に収まっていないため，添付資料２の 4. ③に示す材料非線形解析を用いた検証解析により，せん断補強効果を確認した。

以上より，島根２号炉取水槽（スクリーン室）の PHb 適用部材に対し，せん断スパン比の観点について適用性を有すると判断した。

※1　せん断スパン比＝ａ／ｄ（ａ：せん断スパン，ｄ：部材の有効高さ）

※2　取水槽スクリーン室隔壁のせん断スパンａ＝12.2m（隔壁の全長），部材の有効高さｄ＝1.07m から，せん断スパン比＝ａ／ｄ＝11.40

・主鉄筋比

項目	建設技術審査証明報告書（実証試験）	先行原子力発電所における審査実績（美浜３号炉）	先行原子力発電所における審査実績（東海第二）	島根２号炉取水槽の PHb 適用部材
主鉄筋比	1.48	0.47	0.46	0.85

【検証結果】

・島根２号炉取水槽（スクリーン室）の PHb 適用部材の最大の主鉄筋比は，先行原子力発電所における審査実績（0.47，0.46）と比較して大きいが，実証試験（1.48）と比較して主鉄筋比が十分に小さいため，PHb の定着性能に影響を与えるような付着割裂破壊は生じないと推察される。

以上より，島根２号炉取水槽（スクリーン室）の PHb 適用部材に対し，主鉄筋比の観点について適用性を有すると判断した。

・コンクリート強度

項目	建設技術審査証明報告書（実証試験）	先行原子力発電所における審査実績（美浜３号炉）	先行原子力発電所における審査実績（東海第二）	島根２号炉取水槽の PHb 適用部材
コンクリート強度	32.0～38.3（圧縮強度）	23.5（設計基準強度）	20.6（設計基準強度）	23.5（設計基準強度）

【検証結果】

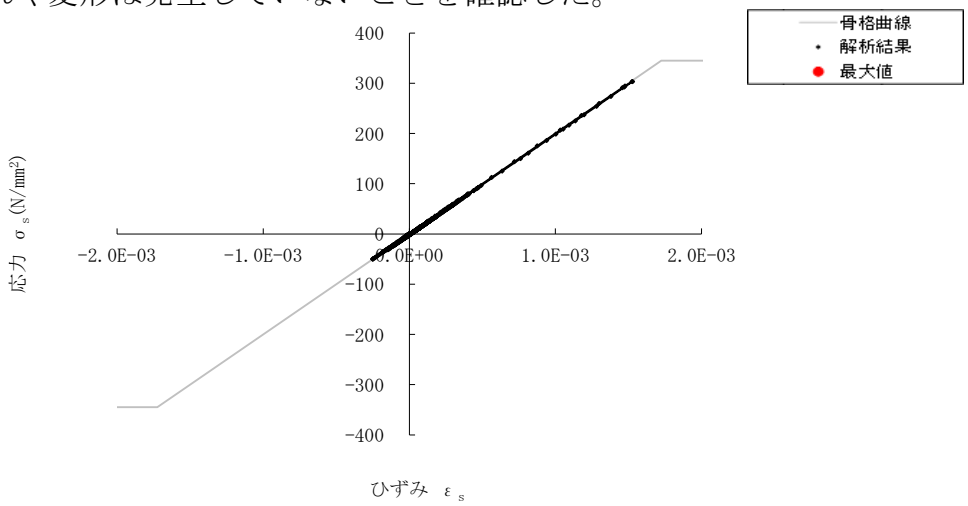
・島根２号炉取水槽（スクリーン室）におけるコンクリート設計基準強度は 23.5N/㎜^{2}であり，先行原子力発電所における審査実績（20.6，23.5）と同等の値となっている。

・設計基準強度 23.5 N/㎜^{2}の鉄筋コンクリートに対する PHb のせん断補強効果については，添付資料２の 4.③に示す材料非線形解析を用いた検証解析により，その有効性を確認した。

以上より，島根２号炉取水槽（スクリーン室）の PHb 適用部材に対し，コンクリート設計基準強度の観点について適用性を有すると判断した。

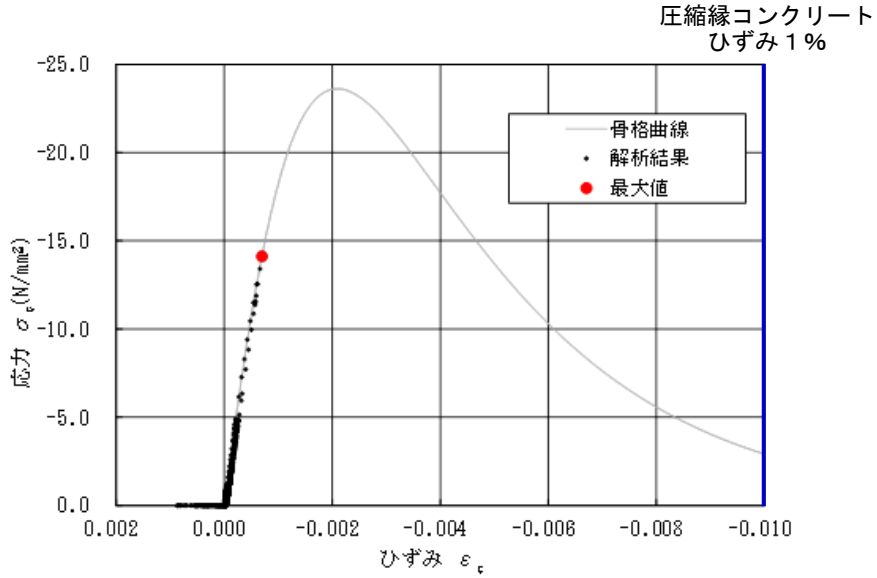
1. 応力状態（損傷状態）

部材の応力状態について，鉄筋コンクリートが健全であることを主鉄筋の引張応力－引張ひずみ関係の骨格曲線と解析結果により確認する。第 13－4－4 図に，取水槽（スクリーン室）隔壁における評価結果のうち，PHb 適用部材の照査値が最も厳しくなる基準地震動Ｓｓ－Ｎ１の損傷程度を示す。隔壁において，主鉄筋の引張応力度の最大値は鉄筋の降伏強度を下回ることから，コンクリートに顕著なひび割れは発生せず，健全であるといえる。なお，取水槽の圧縮縁コンクリートひずみは１％を大きく下回る 0.07%程度であり，かぶりコンクリートに顕著なひび割れは発生せず，健全であることを確認した。また，添付資料２「解析によるせん断補強効果の確認について」で確認したとおり，材料非線形解析における弾性範囲内の挙動においても，在来工法である先施工のせん断補強と比べて特異なひび割れや変形は発生していないことを確認した。



第 13－4－4 図　取水槽の損傷図（1／2）

（主鉄筋の引張応力－引張ひずみ関係の骨格曲線と解析結果）



第 13－4－4 図　取水槽の損傷図（2／2）

（コンクリートの圧縮応力－圧縮ひずみ関係の骨格曲線と解析結果）

m. 変形量

変形量については，先行サイトと同様，取水槽の変形量が適用確認実験の変形量を超えないことを確認する。適用確認実験における層間変形角は 0.4%程度以上であるが，取水槽においては最大でも層間変形角 0.42%であり，適用確認実験の最小変形量程度であることを確認した。なお，適用実験における層間変形角は，実験において発生している変位量及びせん断スパン比から算出した。

n. 使用環境

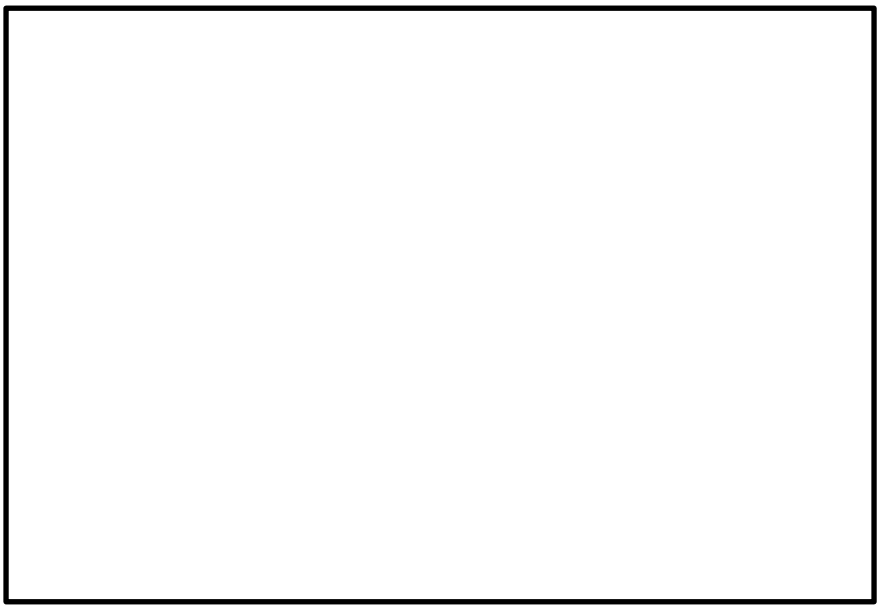
島根原子力発電所２号炉の屋外重要土木構造物における PHb 工法による耐震補強では，先行サイトと同様，気中及び水中の部材に対して PHb 工法を適用する。PHb そのものはすべて構造物内に埋設され，かぶり部分によって腐食に対する抵抗性が確保される。また，「4.6　施工実績・研究事例等の確認」に記載のとおり，気中及び水中で数多くの施工実績があることが確認できている。

4.6　施工実績・研究事例等の確認

(1)施工実績の整理

PHb の施工実績としては，2018 年 4 月 1 日までに，道路，浄化センター，ポンプ場，鉄道，浄水場，水門，配水路，発電所・プラントなど施工中案件を含めて 711 件の工事に適用され，119.2 万本以上が施工されている(第 13－4－4 表参照)。

第 13－4－4 表　PHb の施工実績



PHb の施工実績を部材厚，鉄筋径ごとに整理する。部材厚ごとに整理した結果を第 13－4－5 表に，鉄筋径ごとに整理した結果を第 13－4－6 表に，使用環境ごとに整理した表を第 13－4－7 表に示す。なお，カウントする際は，１件の工事のうち複数にまたがって該当する場合には，各項目でそれぞれカウントしている（例　同一工事内でD13～D22 の鉄筋を用いている場合はD13，16，19，22 の全てにカウント)。水中における施工実績のうち，鹿島共同発電所の取水路においては，海水通水部における実績として挙げられる。今回島根原子力発電所２号炉の構造物に採用する項目についてハッチングしている。表に示すとおり，十分に実績のある範囲にあることが確認できる。

また，島根原子力発電所２号炉建設時期以前に施工された構造物に対しての施工実績があることを確認している。先にも述べたとおり，後施工せん断補強鉄筋工法は，1980 年以前の土木学会コンクリート標準示方書に従って設計された構造物に対してせん断補強を行うことを想定した工法である。

なお，島根原子力発電所２号炉については高経年化技術評価を行い，健全性を確認している。

本資料のうち，枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

第 13－4－5 表　PHb の施工実績（部材厚）（1／2）

部材厚（mm）	件数
～500	249
501～1000	504
1001～1500	352
1501～2000	212
2001～	170

第 13－4－5 表　PHb の施工実績（部材厚）
（上記実績のうち横向き施工）（2／2）

部材厚（mm）	件数
～500	191
501～1000	335
1001～1500	197
1501～2000	118
2001～	118

第 13－4－6 表　PHb の施工実績（鉄筋の種類）

補強鉄筋の種類		件数
SD345	D13	199
	D16	419
	D19	334
	D22	366
	D25	222
	D29	166
	D32	123

第 13－4－7 表 PHb の施工実績（使用環境）

施工場所	件数
気中	48
水中	694

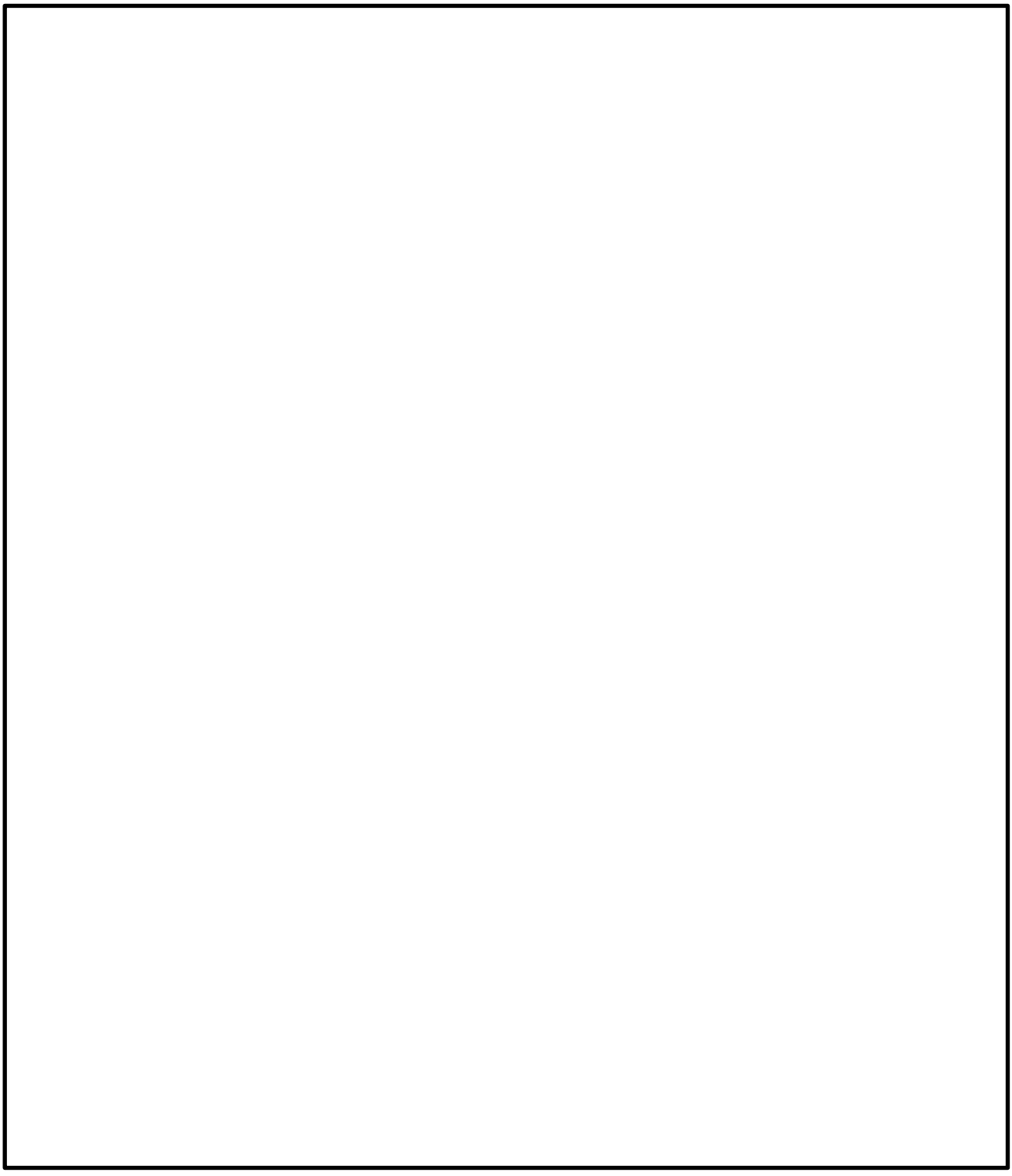
(2)　過去の地震の経験事例

PHb 施工実績のうち，東北地方太平洋沖地震及び熊本地震において，震度５強以上が観測された地域にある,地震発生前に施工された実績若しくは施工中であった実績を抽出した。

東北地方太平洋沖地震及び熊本地震においてK-NETまたはKIK-NETで観測された加速度及び PHb を施工した箇所の位置関係を第 13－4－5 図及び第 13－4－6 図に示す。東北地方太平洋沖地震においては，最大震度６強，熊本地震においては，最大震度６弱の地震を受けた事例があることを確認した。PHb 工法研究会に確認したところ，いずれの地点においても，現時点では，被害・不具合が発生したという報告はない。

第 13－4－5 図　東北地方太平洋沖地震の強震域にある施工実績

本資料のうち，枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。



第 13－4－6 図　熊本地震の強震域にある施工実績

本資料のうち，枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

(3) レベル２地震動を対象とした設計事例

広島空港直下を通る用倉トンネルにおいて，レベル２地震動を対象として耐震補強に鉄筋差込工法（後施工せん断補強鉄筋工法　RMA 工法）を適用したせん断補強事例が報告されている※。本事例においては，広島空港が大都市拠点空港として空港輸送上重要な空港に位置づけられたため，耐震性能照査を行った結果，せん断耐力が不足していることが判明したものによる。用倉トンネルは現場打ちのアーチカルバートの上に 20m 弱の盛土をおこなった構造物である。構造形式等の詳細については，「(5)後施工せん断補強鉄筋に関する研究事例」に記載する。

※参考文献

岡崎大宜：後施工型せん断補強工法を活用した広島空港地下トンネル耐震補強工事について

(4)後施工せん断補強鉄筋工法の比較

PHb 工法以外にも土木研究センターにおいては，類似する後施工せん断補強鉄筋工法の建設技術審査証明が実施されている。後施工せん断補強鉄筋工法の比較結果を第 13－4－8 表に示す。工法に差異はあるものの，コンクリート部分に付着を期待してせん断耐力の向上を期待する点は共通している。また，せん断耐力の算出方法については，工法により多少の差異は存在するもののおおむねトラス理論を基にせん断耐力の算出を行っている。

第 13－4－8 表　後施工せん断補強鉄筋工法の比較（1／2）

※土木研究センター　建設技術審査証明関係資料に基づき作成

本資料のうち，枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

第 13－4－8 表　後施工せん断補強鉄筋工法の比較（2／2）

※土木研究センター　建設技術審査証明関係資料に基づき作成

4条-別紙13-46

本資料のうち，枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

(5)後施工せん断補強鉄筋に関する研究事例

後施工せん断補強鉄筋に関する施工実績・研究事例について，目的，試験体諸元等を整理し，島根原子力発電所２号炉への適用において考慮・反映すべき事項を検討する。

①コンクリート構造物の後（あと）施工せん断補強技術

・目的

挿入された鉄筋やグラウトが既存のコンクリートと一体化し,挿入鉄筋の定着長を考慮したせん断鉄筋の補強効果により,所要の地下壁構造のせん断耐力が得られることを確認する。

・試験体諸元

部材厚：685㎜

せん断補強鉄筋径：D22

荷重条件：正負交番載荷

・特記事項

実験により得られたせん断耐力は,有効係数を用いて算出される設計せん断耐力以上であることはもちろん，標準フック筋での補強に比べ，そん色のないせん断補強効果が得られていることを示している。

・影響確認

島根原子力発電所２号炉では試験例として記載されている PHb 工法を採用している。

②耐震補強等に用いるあと施工型せん断補強技術（RMA 工法）

・目的

RMA 工法の概要及び性能確認実験，設計方法を示す。

・試験体諸元

部材厚：600㎜（せん断スパン比 a／d=約 2.25）

せん断補強鉄筋径：D19（SD345）

荷重条件：正負交番載荷

・特記事項

定着性能試験の結果，定着長が 4D 以上で SD345 の規格降伏強度相当の定着力を確保できる。

宮城県沿岸地域で採用された RMA 工法による補強構造物は,東日本大震災においても損傷がなかった。

・影響確認

PHb も同様の定着性能試験を実施し，定着長を設定している。

③論文　異形鉄筋の埋込みによるあと施工せん断補強効果に関するはりの載荷実験

・目的

既存構造物であるボックスカルバートやU型擁壁などの連続壁に対して,異形鉄筋を埋込むことでせん断補強部材とする方法を提案し,補強方法の有効性を確認することを目的として,はり供試体を用いたせん断実験を行った。

・試験体諸元

部材厚：460㎜（せん断スパン比 a／d=約 2.25）

せん断補強鉄筋径：D10（SD295）

荷重条件：単調載荷

・特記事項

実験結果より後施工は先施工と同等のせん断耐力を有することを確認した。

・影響確認

島根原子力発電所２号炉のせん断補強においては,建設技術審査証明報告書にて規定されている有効係数(上限値 0.9)を用いて低減したせん断耐力を算出し,保守的な設計をしている。

④後施工型のせん断補強工法を活用した広島空港地下トンネル耐震補強工事について

・目的，概要

広島空港の基本施設直下を通る地下構造物（用倉トンネル）において，レベル２地震動に対してせん断耐力が不足していた。用倉トンネルはアーチカルバートの上に 20m 弱の盛土を行った構造物であるため，この盛土部分とアーチカルバートを対象に耐震対策が必要な範囲と耐震補強工法の選定・検討を行い，RMA 工法で現地施工を行った。

・構造体諸元

構造形式：アーチカルバート

補強対象部位：側壁

部材厚：1600㎜

・特記事項

重要施設に対して後施工型せん断補強工法（RMA 工法）による耐震補強を実施した。

・影響確認

レベル２地震動を対象とした重要構造物かつ島根原子力発電所２号炉取水槽の鉛直部材厚さ（隔壁：1200㎜）相当の構造物に対しての施工実績があることを確認した。

⑤地下駅舎 RC 壁のせん断力評価と耐震補強対策

・目的，概要

地中構造物の側壁隅角部を対象に載荷試験を行い，せん断スパンが正載荷・負載荷で異なることを考慮したせん断耐力算定方法を提案した。また，前施工補強と後施工補強との耐力比較,並びに後施工せん断補強鉄筋の埋込長の違いによる耐力比較を行った。

・試験体諸元

部材厚：側壁 460mm，底版 800mm（せん断スパン比　正側
　　a／d=約 2.25，負側 a／d=約 3.25）
せん断補強鉄筋径：D10（SD295）
荷重条件：正負交番載荷

・特記事項

後施工によるせん断補強の場合，設計耐力に対して最低でも 80%程度のせん断耐力が実験で得られた。

・影響確認

実験で用いた補強鉄筋は端部を 45°にカットした直鉄筋であり，端部に定着プレートを有する PHb よりもせん断耐力が小さくなる。PHb では，実験により低減係数に相当する有効係数を設定し，せん断耐力を算定している。

⑥論文　せん断補強筋の定着不良が RC はりのせん断耐力に及ぼす影響

・目的，概要

せん断補強鉄筋の定着不良が RC はりのせん断抵抗機構に及ぼす影響を検討することを目的として,せん断補強鉄筋の定着フック及び端部付近の付着を除去したはりを作製し，せん断耐力の低下と破壊モードを実験的に検証した。また，材料非線形解析における定着不良部のモデル化について検討した。

・試験体諸元

部材厚：350㎜（せん断スパン比 a／d=約 3.2）

せん断補強鉄筋径：D6

荷重条件：単調載荷

・特記事項

定着不良部から鋼材径の 10 倍程度を鋼材無効区間として要素内鉄筋比を等価に規定すれば，２次元ひび割れ解析でせん断耐力を概略評価することが可能である。

・影響確認

部材厚の検討において，PHb のモデル化に本解析手法を参考とした。

⑦地下道における PHb（ポストヘッドバー）工法の採用と積雪寒冷地の施工について

・目的，概要

既設地下道を耐震補強する目的で採用した PHb 工法の実施内容及び積雪寒冷地での施工方法について報告する。充填材の温度と強度の関係を把握するための試験施工を実施した。

・試験体諸元

350㎜×350㎜×650㎜

・特記事項

充填材料が０℃以下の履歴を受けた場合では，強度発現が低下することが確認された。

・影響確認

充填材料が０℃以下とならないように，施工上の管理基準（５℃以上）を設けて適切に施工する。

⑧せん断補強鉄筋埋込工法（あと施工）による東京湾第二航路海底トンネルの側壁補強

奥平幸男・岩下正美・小林亨・清宮理

・目的，概要

東京都港湾局が同工法における補強効果を確認するために行った室内せん断実験の概要と結果,設計条件と施工基準設定の考え方及び適用工事に関する施工結果について考察。

・試験体諸元

部材厚:460㎜（せん断スパン比 a／d=2.25）

・特記事項

施工上予想される不具合を設計上考慮し，せん断耐力に対して低減係数 0.75 を乗じる。

・影響確認

低減係数 0.75 は 2002 年の「③論文　異形鉄筋の埋込みによるあと施工せん断補強効果に関するはりの載荷実験」でも提案されているが，その後 PHb 工法等の後施工せん断補強工法について第三者機関による審査証明が行われており,その中では施工性についても審査対象となっており,本研究事例の低減係数をそのまま設計に適用する必要はないと考えられる。なお，後述の「4.7　PHb の施工上の確認」にて施工精度の向上に向けた方策を記載する。

後施工せん断補強鉄筋に関する各研究事例を踏まえて，島根原子力発電所２号炉の設計，施工への反映事項を下記に示す。

・建設技術審査証明報告書にて規定されている有効係数（上限値 0.9）を用いて，PHb のせん断耐力を算定する。

・充填材の施工管理基準（５℃以上）を設ける。

・施工上予測される不具合の考慮については，施工精度の向上方策を講じるとともに，設計上の配慮についても検討する。

4.7　PHb の施工上の確認

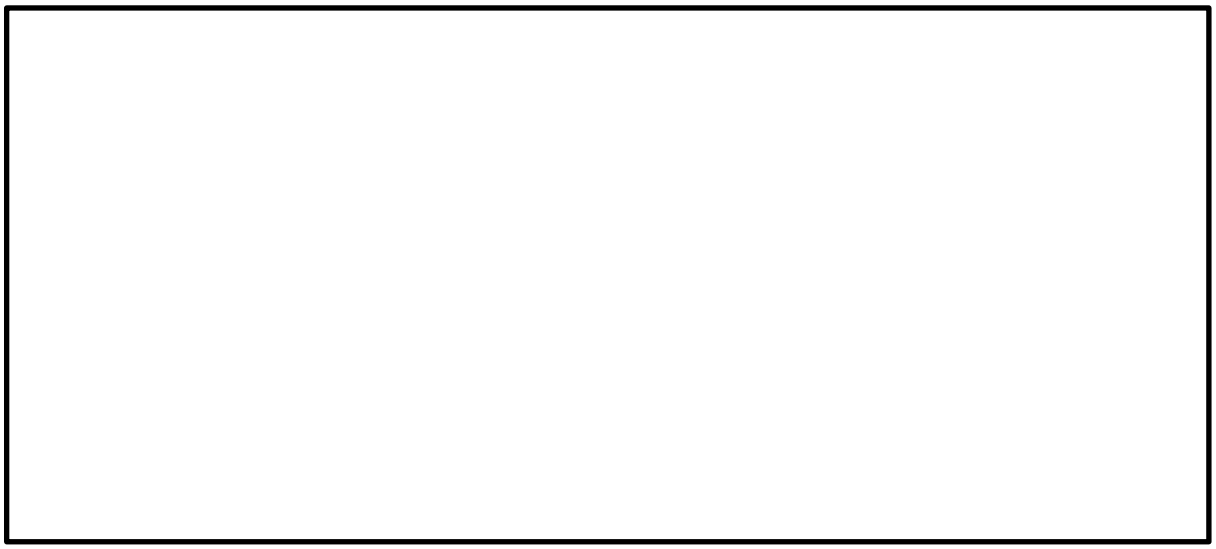
PHb 工法によるせん断補強に当たっては，既設鉄筋配置のずれ等施工のばらつきにより計画どおり施工できなかった場合，期待するせん断補強効果に影響を及ぼす可能性がある。そこで施工上せん断補強効果に影響を及ぼす可能性がある施工のばらつきに関する項目を抽出し，適切な施工管理によりばらつきを生じさせない，若しくはせん断補強効果に大きな影響を及ぼさないことを確認する。

(1)削孔角度

PHb 挿入計画位置をドリルにより削孔するが，削孔角度に誤差が生じた場合，PHb のせん断補強効果に影響が及ぶ可能性がある。そこで施工用架台にドリルを設置し，ドリルの鉛直方向，水平方向が削孔面に対して垂直となるようスラントルール，金尺等で確認し削孔する。第 13－4－7 図に施工用架台に設置した PHb ドリルと鉛直・水平の確認状況を示す。以上より，削孔時に施工用架台を使用することで削孔角度のばらつきは生じない。

また，「建設技術審査証明報告書　技術名称　あと施工型せん断補強用無機系モルタルカプセル及びせん断補強筋「RMA」(建技審証　第 1203 号)」ではコンクリートコアドリル長尺削孔精度確認試験を実施している（第 13－4－8 図)。コンクリートコアドリル長尺削孔精度確認試験では，幅 1,200㎜×高さ 600㎜×長さ 1,200㎜ のコンクリートブロック４体を削孔し，削孔位置のずれを確認した。コンクリートコアドリル長尺削孔精度の計測結果を第 13－4－9 表に示す。ここで，削孔表面から試験体Ⅰ裏まで 1,200㎜ であり，島根原子力発電所２号炉取水槽の部材厚である隔壁 1,200㎜ となることから，第 13－4－9 表の試験体Ⅰ裏の結果を参考にする。試験体Ⅰ裏では削孔誤差は最大 15㎜ となり，削孔角度誤差を換算すると約 0.7° となり，十分精度あることが示されている。

さらに，論文「⑧せん断補強鉄筋埋込工法（あと施工）による東京湾第二航路海底トンネルの側壁補強」において，削孔角度誤差について記載されているが，そこではドリルによる削孔時に２方向より定規を添えて初期削孔を行い，途中２～３回確認することで施工用架台を使用せず誤差２° 以内を確保している（第 13－4－9 図)。今回は施工用架台を使用し，より精度良く削孔することが可能である。



第 13－4－7 図　削孔準備工



第 13－4－8 図　試験概要図

第 13－4－9 表　コンクリートコアドリル長尺削孔精度の計測結果





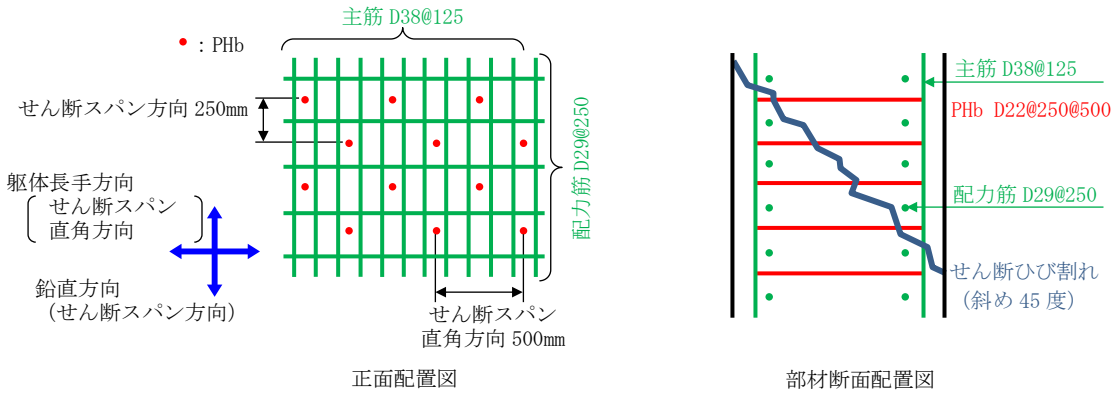
第 13－4－9 図　レッグドリルによる削孔

本資料のうち，枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

(2)削孔位置

PHb 挿入計画位置をドリルにより削孔するが，部材内部に障害物があり計画位置で削孔できず PHb を計画どおり配置できない可能性がある。その場合は，付近を再削孔し PHb を挿入することで設計上必要な補強鉄筋量を確保する。ただし，再削孔し PHb を配置する際は「4.4　建設技術審査証明報告書の適用範囲の確認」に示す建設技術審査証明報告書に記載の構造細目を満足するものとする。なお，第 13－4－10 図に示すせん断補強筋正面配置図及び部材断面配置図のとおり，再削孔する際は削孔計画位置（赤丸）から位置をずらし，せん断補強効果に影響のない位置に削孔することが可能である。なお，孔と鉄筋の干渉を避けて再削孔を行う際，削岩機ベースの PHb ドリルでは孔をラップさせることができないため再削孔位置の選定が制限され，再削孔しても新たに別の鉄筋に干渉してしまう可能性がある。そこで，孔のラップが可能な PHb 工法指定の特殊コアドリルを必要に応じて併用することとし，再削孔時の精度向上を図る。

以上より，削孔位置にばらつきが生じても必要鉄筋量を確保するためせん断補強効果に影響を及ぼさない。



第 13－4－10 図　取水槽のせん断補強筋正面配置図及び部材断面配置図

(3)定着効果

充填材の定着効果については，建設技術審査証明報告書にて充填確認試験を実施しており，削孔内に設置した PHb の先端定着部までグラウトが密実に充填され，PHb とコンクリート躯体が一体となっていることを確認している。

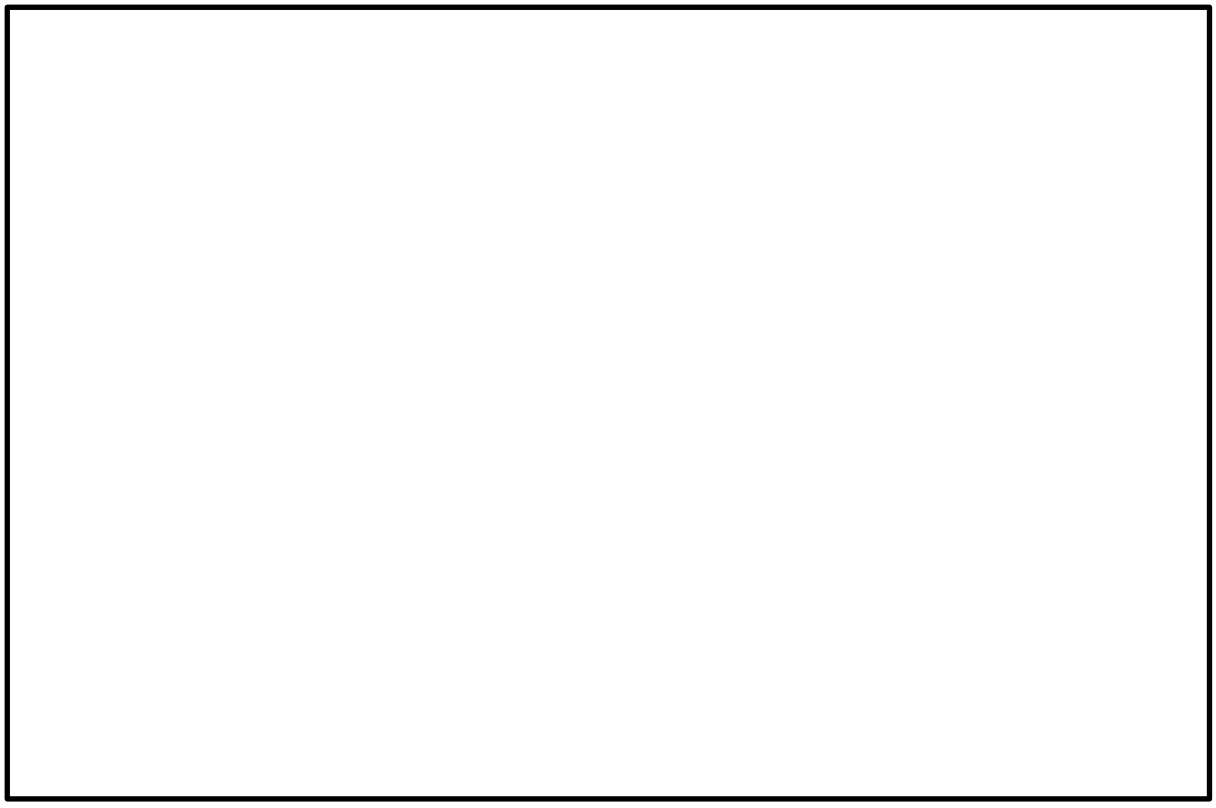
(1)～(3)に示したとおり，施工上の配慮により，せん断補強効果に大きな影響を及ぼすような施工のばらつきは生じないと考えられる。しかし，現時点では後施工による施工のばらつきに対して施工実績に基づく十分な統計がとれていないため，施工のばらつきによる影響が生じる可能性を完全に否定することはできない。

以上を踏まえて，適切な施工管理を実施してもなお発生しうる施工のばらつきに対する設計上の配慮として，耐震評価上の裕度（たとえば照査値を８割程度に抑える）を持たせた設計を行うこととする。

その他施工上の留意点の確認等については，添付資料３「施工管理要領書（案）（取水槽耐震補強工事（ポストヘッドバー工法））」にて実施する。

4.8　PHb の適用性確認結果

「4.2　耐震評価に基づく補強仕様の設定」で設定した補強仕様が「4.1　方針」に沿って，PHb の島根原子力発電所２号炉の屋外重要土木構造物の耐震補強における適用性を検討した結果，PHb を採用し，建設技術審査証明報告書のとおりせん断補強効果を期待できることを確認した。決定した補強仕様を第 13－4－11 図に示す。



第 13－4－11 図　補強仕様

添付資料

（添付資料１）建設技術審査証明書

（添付資料２）解析によるせん断補強効果の確認について

（添付資料３）「施工管理要領書（案）（取水槽耐震補強工事（ポストヘッドバー工法））」

（添付資料４）建設技術審査証明報告書の実験条件を超えるせん断スパン比に対する PHb の適用性について

本資料のうち，枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

建設技術審査証明書

建技審証第 0522 号

技術名称　後施工プレート定着型せん断補強鉄筋「Post-Head-bar」

(開発の趣旨)

せん断補強を構造物の内側からしか施工できない供用中の既設構造物においても、構造物の片側からの施工が可能で、かつ、せん断耐力の補強に限定してせん断余裕度を向上させることでせん断破壊モードから曲げ破壊モードに移行させることができる後施工せん断補強鉄筋を提供する。

(開発目標)

(1) 力学性能

①後施工せん断補強鉄筋の定着性能

後施工せん断補強鉄筋の実降伏荷重を発揮するために必要な円形プレート側の定着長が、鉄筋種類および鉄筋径に応じて設定できること。

②施工後のせん断耐力

「Post-Head-bar」のせん断耐力への寄与分は、新設構造物に一般に用いられている半円形フックタイプのせん断補強鉄筋が受け持つせん断耐力の算定方法において「Post-Head-bar」の規格降伏強度を使用して求めた値に対し、適用部材の軸方向鉄筋間隔および「Post-Head-bar」円形プレート側の必要定着長から評価される有効係数を乗じたものとして評価できること。また、せん断スパン比の小さい部材に対しても、SD345 以上の材質の Post-Head-bar により補強した場合には、せん断スパン比が小さい部材に適用されるせん断耐力算定式に Post-Head-bar の有効係数を用いて評価できること。

③施工後の変形性能

新設構造物で一般に用いられる半円形フックタイプのせん断補強鉄筋を用いた部材の軸方向鉄筋の座屈が生じるまでの変形レベルと同等のじん性率が確保されること。

補強後の部材の骨格曲線は、補強後の合計せん断補強鉄筋量に上限値を考慮して設定した量のせん断補強鉄筋が配置された部材として算定できること。

(2) 施工性

①適用部材

背面に地盤や水、機器などの障害物などがあるような制約のある施工条件においても、構造物の片側からのみの施工によりせん断補強できること。

②施工の容易性と迅速性の評価

狭い空間や複雑な部位においても、大型機材を必要とせず、かつ、短時間に施工できる作業の容易さがあること。

一般財団法人土木研究センターの建設技術審査証明事業実施要領に基づき、依頼のあった標記の技術について下記のとおり証明する。

平成 17 年　12 月 21 日
平成 22 年　12 月 21 日　内容変更・更新（依頼者変更）
平成 23 年　 8 月 22 日　内容変更
平成 27 年　12 月 21 日　更新
平成 28 年　10 月 17 日　内容変更

建設技術審査証明事業実施機関
一般財団法人　土木研究センター
理事長　西川和廣

記

1. 審査証明の結果

「Post-Head-bar」は以下の性能を有することが確認された。

(1) 力学的性能

①後施工せん断補強鉄筋の定着性能

後施工せん断補強鉄筋の実降伏荷重を発揮するために必要な円形プレート側の定着長が、鉄筋種類および鉄筋径に応じて審査証明報告書に示す値で設定できることが確認された。

②施工後のせん断耐力

「Post-Head-bar」のせん断耐力への寄与分は、新設構造物に一般に用いられている半円形フックタイプのせん断補強鉄筋が受け持つせん断耐力の算定方法において「Post-Head-bar」の規格降伏強度を使用して求めた値に対し、適用部材の軸方向鉄筋間隔および「Post-Head-bar」円形プレート側の必要定着長から評価される有効係数を乗じたものとして評価できることが確認された。また、せん断スパン比の小さい部材に対しても、SD345 以上の材質の Post-Head-bar により補強した場合には、せん断スパン比が小さい部材に適用されるせん断耐力算定式に Post-Head-bar の有効係数を用いて評価できることが確認された。

③施工後の変形性能

新設構造物で一般に用いられる半円形フックタイプのせん断補強鉄筋を用いた部材の軸方向鉄筋の座屈が生じるまでの変形レベルと同等のじん性率が確保されることが確認された。

補強後の部材の骨格曲線は、補強前のせん断補強鉄筋と「Post-Head-bar」を合わせた実配置に対し、変形性能に寄与する補強後のせん断補強鉄筋量の設定値に上限を設けた部材として算定できることが確認された。

(2) 施工性

①適用部材

背面に地盤や水、機器などの障害物などがあるような制約のある施工条件においても、構造物の片側からのみの施工によりせん断補強できることが確認された。

②施工の容易性と迅速性の評価

狭い空間や複雑な部位においても、大型機材を必要とせず、かつ、短時間に施工できる作業の容易さがあることが確認された。

2. 審査証明の前提

(1) 本審査証明は、依頼者からの試験データ等の資料を基に審査し、確認したものである。
(2) 「Post-Head-bar」は、所定の材料を用いて、適正な品質管理のもとで製造されるものとする。
(3) 「Post-Head-bar」は、適正な補強設計によって計画されるものとする。
(4) 「Post-Head-bar」は、適正な機材および施工手順によって設置されるものとする。
(5) 「Post-Head-bar」は、適正な管理のもとで施工されるものとする。

3. 審査証明の範囲

(1) 地震時の変形量が限定される地中構造物など、背面に地盤などがあり片側からしか施工できない制限を有する既設コンクリート構造物に対して、後施工によるせん断補強の目的で用いる。
(2) 堰、水門、橋台や橋脚等の既設の半地下および地上構造物に適用する場合には、地中構造物の場合と同様にせん断補強の目的で用いるものとし、曲げ破壊モードにある構造物の変形性能の改善を目的とする補強に用いてはならない。せん断補強により 2 次的に得られる変形性能を考慮する場合には、変形の応答値は変形性能に寄与する補強後のせん断補強鉄筋量の上限を「Post-Head-bar」の矩形プレート側で 0.30%、円形プレート側で 0.15%として求めた部材の骨格曲線の範囲内に限定する。
(3) 杭で支持される橋脚のフーチングのようなせん断スパン比の小さい部材に対して、後施工によるせん断補強の目的で用いる。

4. 審査証明の詳細：　建設技術審査証明報告書
6. 審査証明の有効期限　　平成 32 年 12 月 20 日
7. 審査証明の依頼者

大成建設株式会社
所在地：東京都新宿区西新宿 1-25-1

成和リニューアルワークス株式会社
所在地：東京都港区六本木 1-6-1

添付資料２

解析によるせん断補強効果の確認について

1.　せん断補強効果の確認

PHb による補強効果については，建設技術審査証明報告書の各種実験にて検証している。建設技術審査証明報告書では，実験を上回る部材厚については，理論式により求められる有効係数β_{aw}を実験の部材厚で得られた値である 0.9 を上限として用いることで保守的な設計としている。島根原子力発電所２号炉取水槽の部材厚は，実験で用いた部材と比べて大きいため，実験を上回る部材厚でも PHb の補強効果が期待でき適用性を有することを解析により補足する。また，部材厚以外にもせん断スパン比，主鉄筋比，コンクリート設計基準強度，せん断ひび割れ抑制効果及び荷重載荷方法が島根原子力発電所２号炉取水槽で建設技術証明報告書に記載の各種実験と異なっている。したがって，これらの項目についても実構造物諸元相当の解析により，PHb 工法のせん断補強効果に影響を及ぼすと考えられる項目が建設技術審査証明報告書における実験条件と異なっていても，建設技術審査証明報告書で確認したとおりのせん断補強効果を期待できることを解析により補足する。

1.1 検討方針

PHb を考慮した材料非線形解析により力学的挙動を確認し，島根原子力発電所２号炉取水槽の PHb の適用性をステップ①～③により確認する（第 1-1 図）。

なお，比較のために，従来工法である先施工のせん断補強筋を想定した材料非線形解析も以下の各ケースで実施することとする。

① PHb の解析モデル上の考慮方法について検証

材料非線形解析を実施するに当たり，PHb の解析モデルへの考慮方法の妥当性を確認する必要がある。そこで，建設技術審査証明報告書におけるせん断耐力実験を対象に解析モデルを作成し，実験結果と解析結果においてせん断耐力を比較することにより，解析モデルの妥当性を検証する。

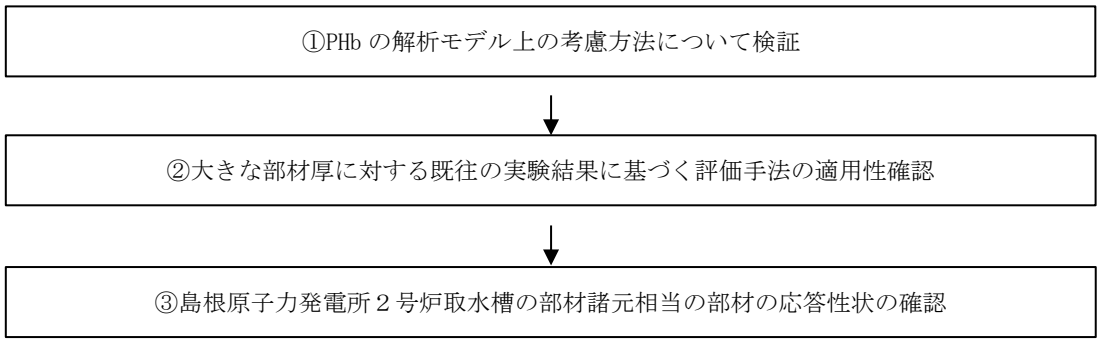
なお，先施工せん断補強鉄筋はフックを有し鉄筋に定着をとっているが，フックを有しないせん断補強鉄筋である PHb はコンクリートに定着をとっていることから，その違いをモデル上で考慮する必要がある。そのため「コンクリート工学年次論文集　Vol.26,No.2,2004　せん断補強筋の定着不良が RC はりのせん断耐力に及ぼす影響」を参考に，供試体をモデル化する際に要素内鉄筋比を０とする区間を設けることとし，実験への再現性が高い区間設定を基に②以降の検討を実施する。

②大きな部材厚に対する既往の実験結果に基づく評価手法の適用性の確認

建設技術審査証明報告書の各種実験では，部材厚の大きい供試体で実験を行っていないため，有効係数β_{aw}の上限値を 0.9 としている。そこで，部材厚が大きい対象に対しても適用可能であること示すため，島根原子力発電所２号炉取水槽を想定した大きな部材厚を参考に，せん断スパン比がステップ①と同等となる部材寸法に対して材料非線形解析を実施する。なお，解析モデルのせん断スパン比は①と同様（相似形）とする。材料非線形解析により既往の実験結果の再現解析と比較して傾向を把握し，大きな部材厚に対しても PHb を適用できることを確認する。

③ 島根原子力発電所２号炉取水槽の部材諸元相当の部材の応答性状の確認

①，②を確認のうえ，島根原子力発電所２号炉取水槽の部材諸元相当の部材の解析モデルについて材料非線形解析（解析的実験）を実施し，PHb の適用性を確認する。適用性を確認する際には，部材の応答性状により島根原子力発電所２号炉取水槽の部材諸元相当でも変形量，ひび割れ及び設計荷重に関して特異な応答が生じていないことを確認する。



第 1-1 図　島根原子力発電所２号炉取水槽スクリーン室の PHb の適用性確認フロー

2.　①の解析内容

材料非線形解析にて用いるRCの構成則については種々あるが，ここでは，現在までに実務でも使用され，適用性と信頼性が確認されている「コンクリート標準示方書　設計編（土木学会　2012)」において標準とされている以下の手法とする。

・鉄筋とコンクリートとの一体性を前提とする分散ひび割れモデルにてモデル化する。
・鉄筋との複合作用が支配的な鉄筋周辺のコンクリートについては，平均化構成則を用いる。
・鉄筋との複合作用が及ばない領域では，コンクリートの破壊力学の概念を導入する。

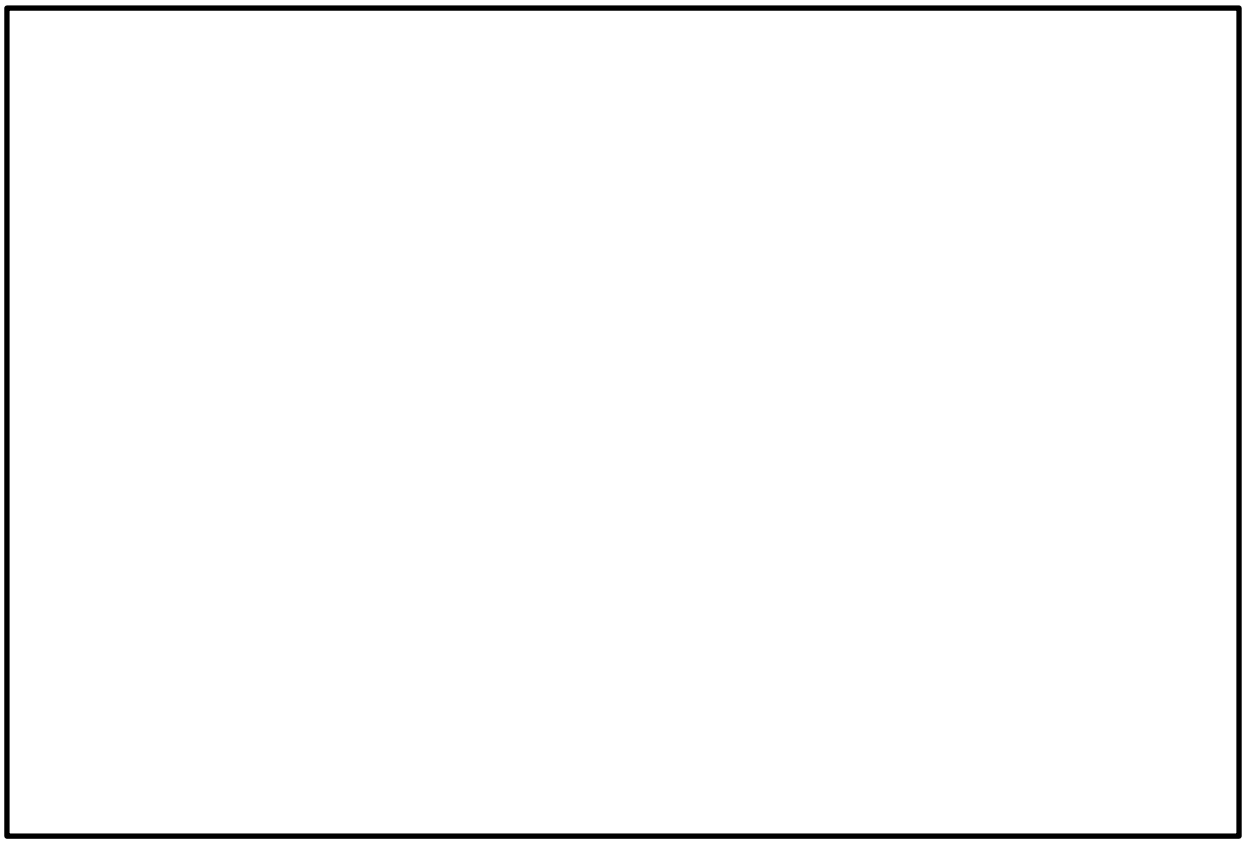
材料非線形解析について用いる解析コードは，上記のRCの構成則を有する解析コードの１つとして「UC-win／WCOMD　ver2.01」とする。

まず，PHbの考慮の仕方を検討するための予備解析を実施した後，その考慮方法を用いてCASE5の再現解析を実施する。

2.1　モデル化について

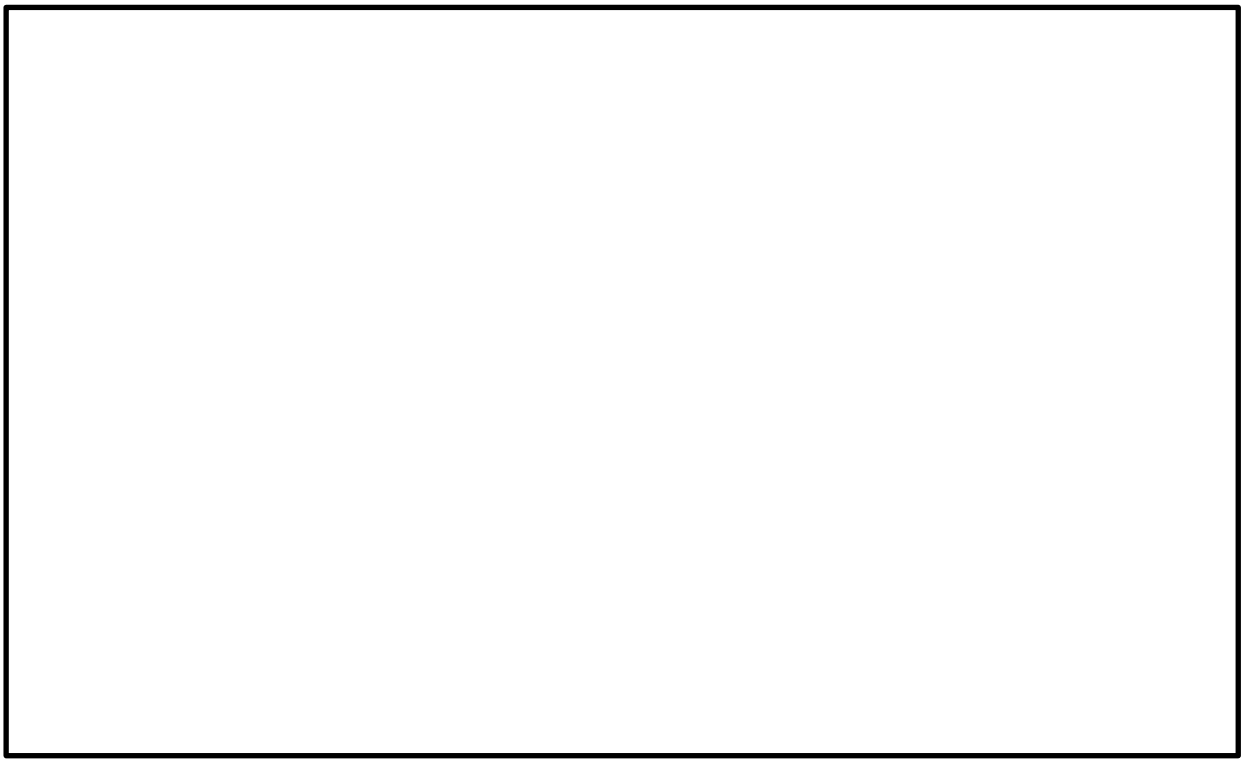
材料非線形解析では，建設技術審査証明報告書の実験で用いた試験体（CASE５）をモデル化する。第 2-1 図にモデル化の対象とする試験体（CASE５）を，第 2-2 図にせん断耐力の向上性能確認試験の加力要領を示す。なお，CASE５は PHb 先端位置が主鉄筋手前であり，施工時の条件と一致している。また，第 2-1 表に示すとおり，CASE５は破壊形態がせん断破壊先行であり，適切にせん断耐力を評価できること，かつ①の再現解析においては実験値と理論値が整合的である必要があるため，その条件を満たすCASE５を選定した。

構造部材をモデル化する際は，平面応力要素にてモデル化する。構造部材のモデル化に当たっては，第 2-3 図に示すとおり鉄筋の付着が有効な領域を鉄筋コンクリート要素としてモデル化し，付着の影響が及ばない領域を無筋領域としてモデル化する。主筋領域については付着領域を考慮して芯かぶりの厚さを基準として設定する。



第 2-1 図　せん断耐力向上性能試験体の種類と補強方法
（建設技術審査証明報告書より抜粋）

本資料のうち，枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

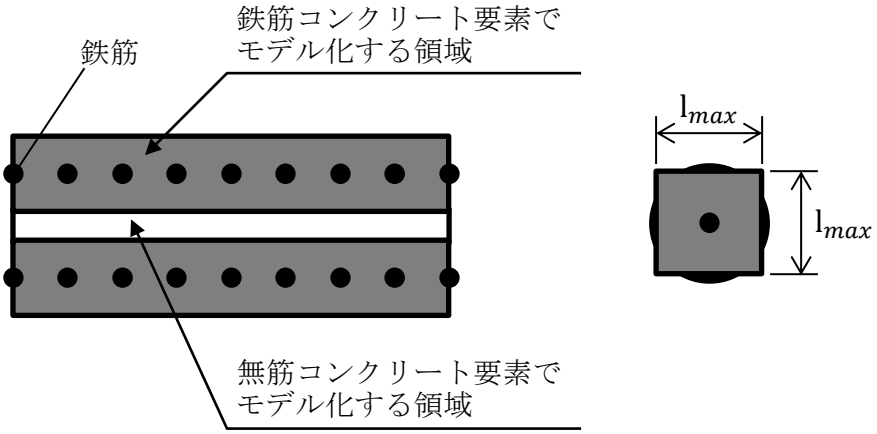


第 2-2 図　せん断耐力の向上性能確認試験の加力要領
（建設技術審査証明報告書より抜粋）

第 2-1 表　各実験ケースの破壊形態

	シリーズ 1			シリーズ 2			シリーズ 3					シリーズ 4
	CASE1	CASE2	CASE3	CASE4	CASE5	CASE6	CASE3-1	CASE3-2	CASE3-3	CASE3-4	CASE3-5	CASE4-1
破壊形態	せん断破壊先行	せん断破壊先行	曲げ変形卓越	せん断破壊先行	せん断破壊先行	曲げ変形卓越	せん断破壊先行	せん断破壊先行	せん断破壊先行	せん断破壊先行	せん断破壊先行	せん断破壊先行

本資料のうち，枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。



$$l\max = \frac{\sqrt{\pi}}{2} Db \sqrt{fy/ft}$$

ここで，$l$max：鉄筋一本あたりの付着有効面積を正方形で考えた場合の一辺の長さ

Db：鉄筋の直径

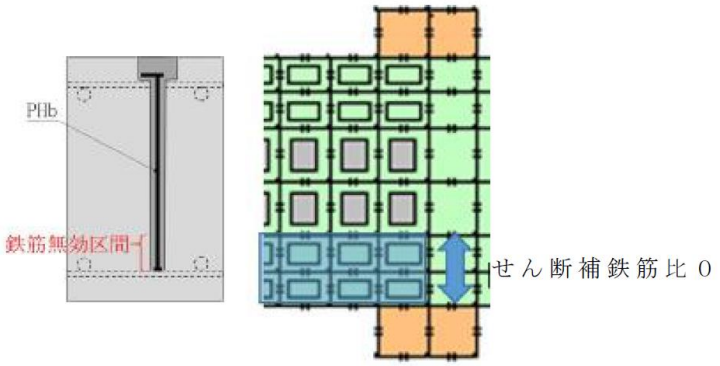
fy：鉄筋の降伏強度

ft：コンクリートの引張強度

第 2-3 図　鉄筋付着有効領域と無筋領域の分割の概要

PHb を適切にモデル化するため,「コンクリート工学年次論文集　Vol.26,No.2, 2004　せん断補強筋の定着不良が RC はりのせん断耐力に及ぼす影響」を参考に, PHb 先端の領域では，付着が十分ではない可能性があるため，せん断補強筋が機能しないものとして PHb のモデル化を検討する。具体的には，該当する部分のせん断補強鉄筋比を 0 としてモデル化を実施する。モデル化のイメージを第 2-4 図に示す。以上の考え方をベースに PHb のモデル化を実施する際は以下のケースを実施して PHb のモデル化手法を検討する。

・PHb１：主鉄筋領域（芯かぶりの２倍分）に相当する厚さ（PHb 先端から 4.4D）のせん断補強鉄筋比を 0 とするケース
・PHb２：上記のモデルをベースに PHb の必要定着長である 5D 分の厚さのせん断補強鉄筋比を 0 とするケース



第 2-4 図　PHb のモデル化イメージ

上記の予備解析の結果，実験値のせん断耐力の再現性が高い条件を用いて，以下のケースを実施する。

・ケース①－Ａ：先施工によるせん補強鉄筋を想定してモデル化するケース
・ケース①－Ｂ：PHb を考慮して，鉄筋無効区間を設定するケース
（単調載荷）（PHb１のケースと同じ）
・ケース①－Ｃ：PHb を考慮して，鉄筋無効区間を設定するケース
（交番載荷）

なお，解析の入力データとなるコンクリート及び鉄筋の材料特性を第 2-2 表及び第 2-3 表に示す。

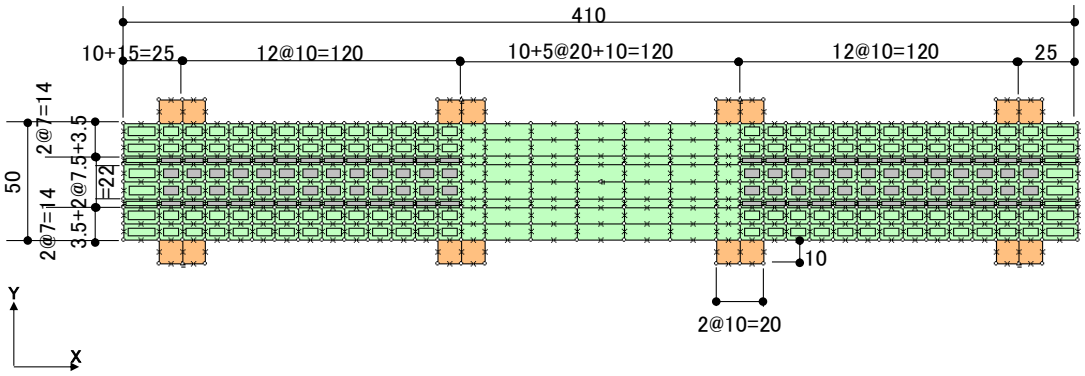
以上，条件により設定した解析モデル図を第 2-5 図に示す。

第 2-2 表　コンクリートの材料特性

項目	設定値
圧縮強度 f’ c	32N/mm^2
引張強度 ft	2.32N/mm^2（小数２位に四捨五入） (=0.23×32.0$^{2/3}$=2.3182)
ヤング係数 Ec	ＷＣＯＭＤで自動計算

第 2-3 表　鉄筋の材料特性

項目	設定値
主鉄筋及びせん断補強鉄筋のヤング係数	200kN/mm^2
主鉄筋の降伏強度	999N/mm^2
PHb 鉄筋の降伏強度	384N/mm^2
その他鉄筋（D16，D19）の降伏強度	345N/mm^2



（単位：cm）

第 2-5 図　解析モデル図

2.2　荷重条件

材料非線形解析にて考慮する荷重は，建設技術審査証明報告書の実験における載荷条件を模して，変位を作用位置に強制的に与える。また鉄筋コンクリートの非線形特性を考慮するため，十分小さい値を漸次載荷する。耐力の評価を主目的とするため，単調載荷とするが，実験条件である交番載荷の影響についても確認することとする。

2.3　破壊判定基準

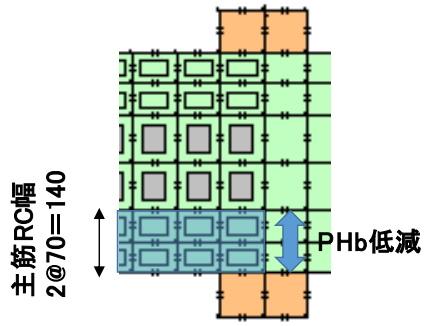
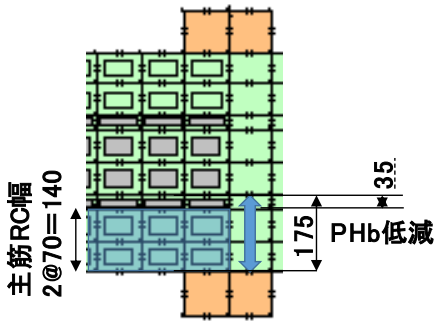
材料非線形解析における構造部材の破壊判定基準は，既往の研究事例に基づき圧縮ひずみ１％，せん断ひずみ２％，引張ひずみ３％とする（以下「１，２，３％破壊基準」という）。

2.4　PHb のモデル化の検討

PHb のモデル化検討の結果を第 2-4 表に示す。表に示すとおり，実験で得られたせん断耐力 486kN に対し，PHb１のケースでのせん断耐力は 477kN（実験値の 98%），PHb２のケースでのせん断耐力は 341kN（実験値の 70%）であった。

評価の結果，PHb１のケースが実験値のせん断耐力を再現できており，PHb２のケースでは，実験値のせん断耐力を再現できない結果となった。材料非線形解析のモデル化では，鉄筋の付着領域を考慮してモデル化を実施するため，PHb の鉄筋径の倍数に合わせて小さい無筋要素を挿入することが有意に働かない結果となった。したがって，PHb を材料非線形解析でモデル化する際は，主筋領域（芯かぶりの２倍分）相当を目安として鉄筋無効区間としてモデル化することとする。なお，従来的な先施工によるせん断補強鉄筋を考慮した場台の材料非線形解析も併せて実施することにより PHb の有効性を確認することとする。

第 2-4 表　PHb の定着区間のモデル化

PHb１		主筋領域２要素分（PHb 先端から 4.4D 分）の鋼材比を０ ・実験値（CASE５）：486kN ・１，２，３％破壊基準：477kN （実験値の 98％）
PHb２		PHb 先端から必要定着長である 5D 分の要素の鋼材比を０とするために無筋要素を挿入 ・実験値（CASE５）：486kN ・１，２，３％破壊基準：341kN （実験値の 70％）

2.5　解析結果と実験結果の比較

材料非線形解析で得られる結果と建設技術審査証明報告書における実験値を比較しておおむね整合的であることを確認する。

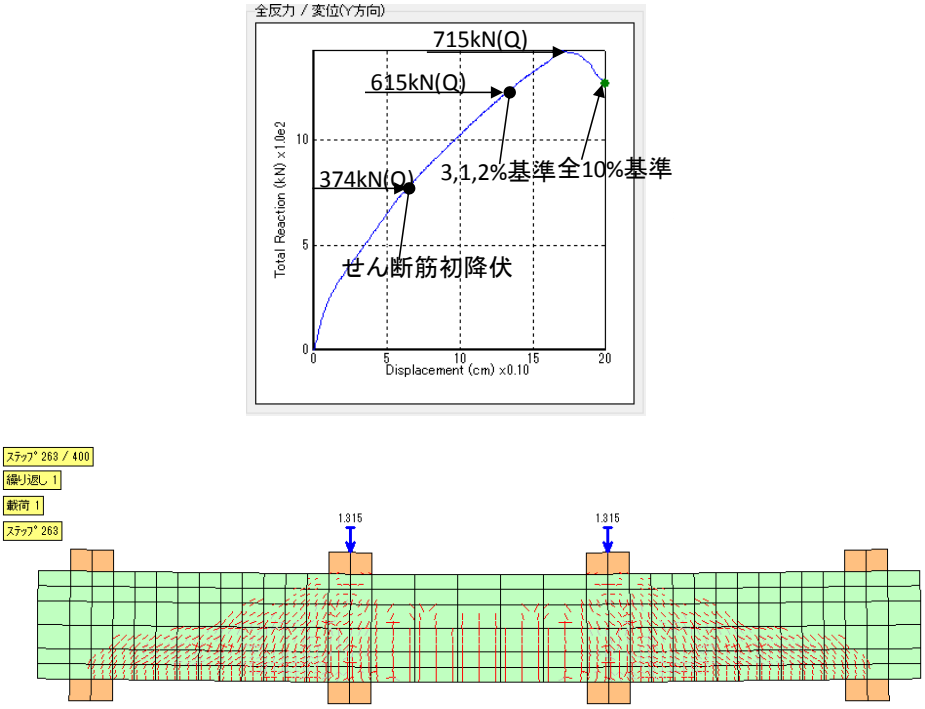
ケース①－Ａ～①－Ｃの解析結果について第 2-6 図～第 2-8 図に，実験結果について第 2-9 図に示す。破壊基準に至るまでの最大荷重をせん断耐力とする。

実験値（CASE５：486kN）に対して，ケース①－Ａは PHb の定着不良領域を設定していないため実験値に対して上回ったと考えられ，ケース①－Ｂ及びケース①－Ｃではせん断耐力はおおむね実験を再現できている。また，ひび割れ状況については①－Ａが部材全体にひび割れが分散しているのに対し，①－Ｂにおいては，若干ひび割れの分散性が低下しており，スパン中央側に寄った部位に発生している。これは，参考にした論文である「コンクリート工学年次論文集　Vol.26，No.2，2004　せん断補強筋の定着不良が RC はりのせん断耐力に及ぼす影響」においても同様の傾向が確認できており，PHb の定着不良分を適切にモデル化できていると考えられ，応力の伝達状況も再現できていると考えられる。一方，荷重－変位図については，解析結果は実験よりも早い段階でピークに達しており，荷重については再現性が認められるものの，変位については十分には再現できなかった。

実験では正負交番載荷が行われており，再現解析においては載荷条件が模擬できることが望ましい。しかし，第 2-8 図で示すように荷重－変位曲線の再現が十分ではない現段階においては，正負交番を模した解析を実施することは必ずしも有意とは限らない。単調載荷でも荷重の再現性は確認されており，せん断耐力やひび割れの発生（応力の伝達）状況は良好に再現されている。なお，ケース①－

Ｃにおいては，破壊基準に達した時点で解析は終了しており，その後の繰返し載荷に対して剛性が低下して荷重－変位曲線の傾きが小さくなる現象までは確認できていない。

・ケース①－Ａ
１，２，３％破壊基準までの最大荷重：615kN
実験値（CASE５）：486kN

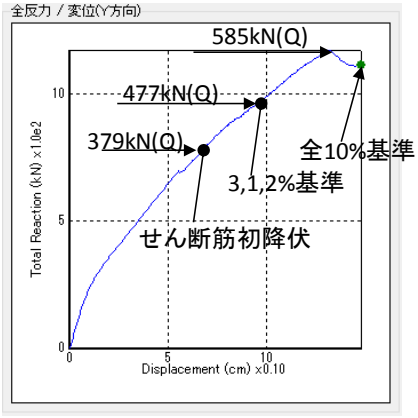


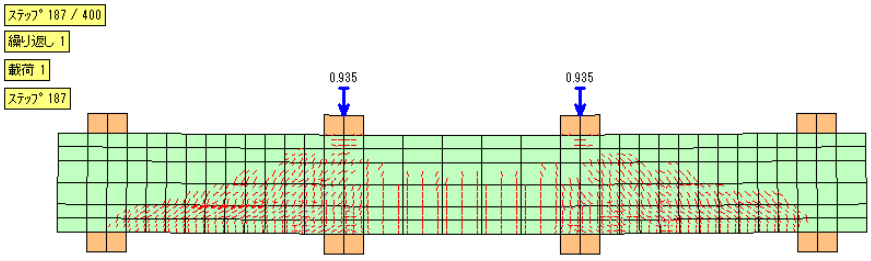
第 2-6 図　ケース①－Ａの荷重－変位関係とひび割れ状況

・ケース①－Ｂ

１，２，３％破壊基準までの最大荷重：477kN（実験値の 98%）

実験値（CASE５）：486kN



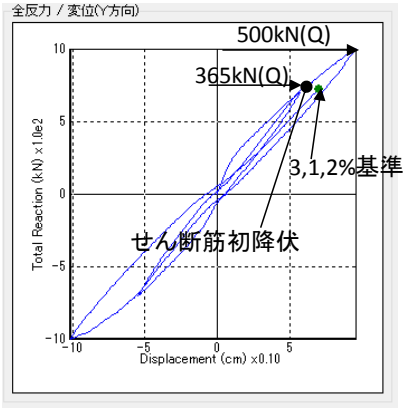


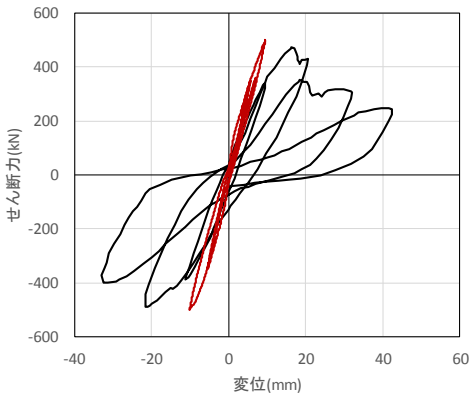
第 2-7 図　ケース①－Ｂの荷重－変位関係とひび割れ状況

・ケース①－Ｃ

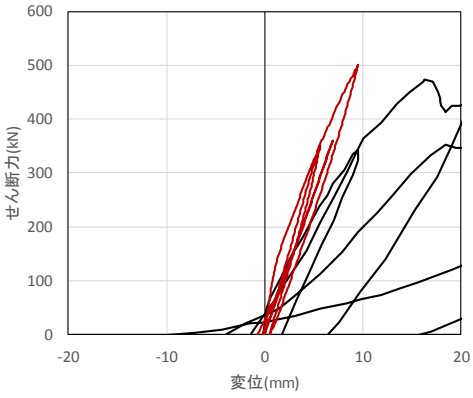
１，２，３％破壊基準までの最大荷重：500kN（実験値の 103％）

実験値（CASE５）：486kN



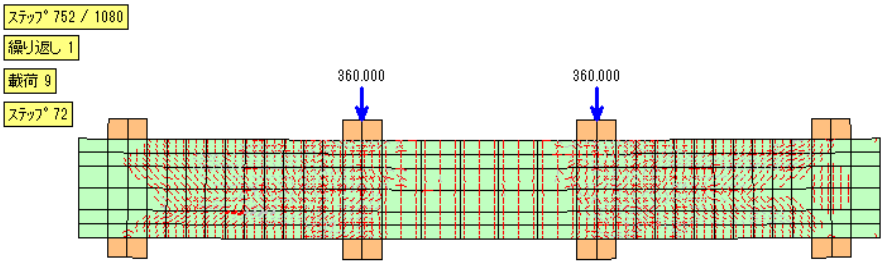


荷重変位図



荷重変位図（拡大図）

（赤：材料非線形解析　黒：実験値）



第 2-8 図　ケース①－Ｃの荷重－変位関係とひび割れ状況

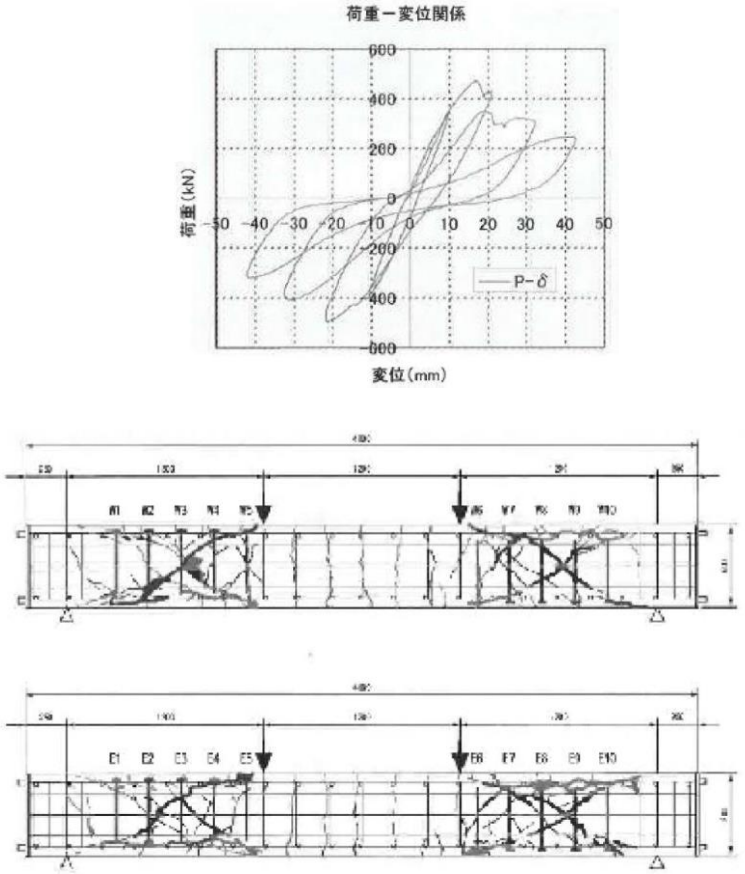


図-8.2 Post-Head-bar（2列）を後施工したはり試験体（先端：主鉄筋手前）の破壊状況(CASE5)

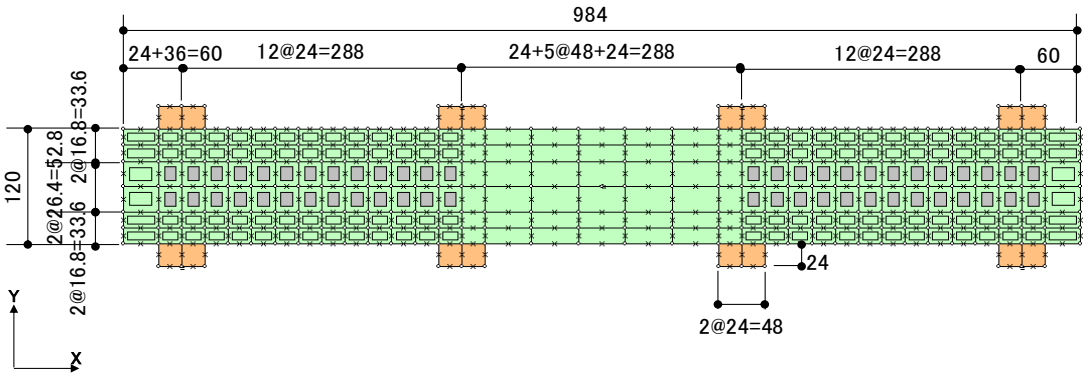
第 2-9 図　構造実験（CASE５）の荷重－変位関係とひび割れ状況

3.　②の解析内容

3.1　モデル化について

部材厚は島根原子力発電所２号炉取水槽の部材を参考に設定し，せん断スパン比（a／d）が①と同等となるような部材寸法（①の躯体の相似形）とする。配筋については，主鉄筋，せん断補強筋共に鉄筋比が一定となるように設定する。「2.1 モデル化について」に準じて設定する。なお，PHb の鉄筋無効区間は①で確認された主筋領域（芯かぶりの２倍）を目安とする。また，材料物性については，構造実験と同一とする。

解析モデル図を第 3-1 図に示す。



（単位：cm）

第 3-1 図　解析モデル図

3.2　荷重条件

「2.2　荷重条件」に準じて設定する。

3.3　破壊判定基準

「2.3　破壊判定基準」に準じて設定する。

3.4　解析結果

在来工法によるせん断補強を想定したケースをケース②－Ａとし，PHb 工法によるせん断補強を想定したケースをケース②－Ｂとする。参考に交番載荷としたケースを②－Ｃとする。実施するケースを第 3-1 表に示す。それぞれの結果を第 3-2～4 図に示す。ケース②－Ａのせん断耐力は 1,335kN，ケース②－Ｂのせん断耐力は 1,235kN であり，在来工法と PHb 工法のせん断耐力の比率は約 93％となった。ここで，ケース①－Ａとケース①－Ｂから得られるせん断耐力の比率は約 78％であった。これは，建設技術審査証明報告書における β_{aw} の算出する際の理論と同様の傾向であり，部材厚が大きい部材程，PHb によるせん断補強効果が大きくなることが確認できた。ひび割れ状況についても全体的にひび割れが分散しており，在来工法と顕著な差は見られなかった。ステップ①では PHb によるひび割れの分散性が低下したが，ステップ②においては，部材厚が大きくなることで PHb 端部定着の影響が小さくなったと考えられる。PHb によるせん断ひび割れ抑制効果についても在来工法と PHb 間で顕著な差は見られなかった。

また，ケース②－Ｃの交番載荷のケースにおけるせん断耐力は 1,200kN であり，在来工法と PHb 工法の比率は約 90％となった。ひび割れ状況についても，部材全体にひび割れが分散しており，特異な応答は確認されなかった。

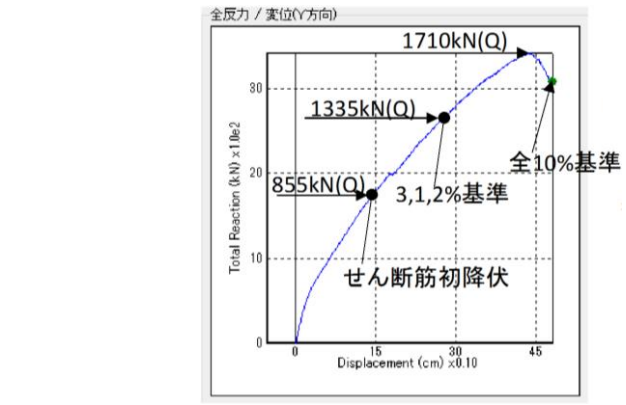
ステップ①，②の評価結果一覧を第 3-2 表に示す。また，ステップ②の解析結果を第 3-5～7 図に示す。

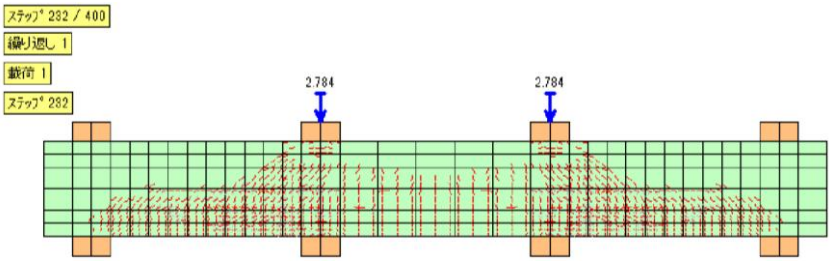
第 3-1 表　ケース一覧

ケース	荷重載荷方法
②－Ａ	単調載荷
②－Ｂ	単調載荷
②－Ｃ	交番載荷

・ケース②－Ａ

破壊基準時の最大荷重：1,335kN

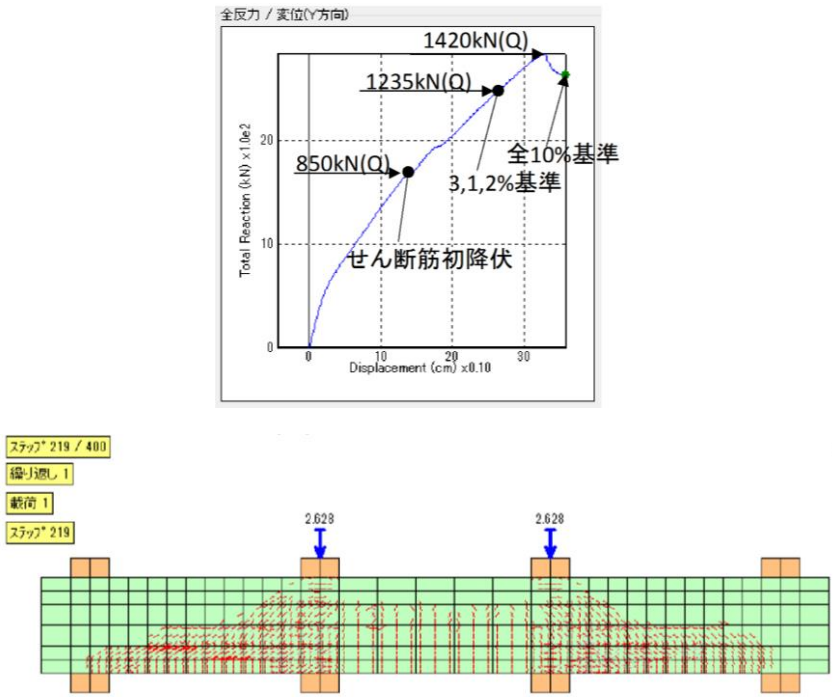




第 3-2 図　ケース②－Ａの荷重－変位関係とひび割れ状況

・ケース②－Ｂ

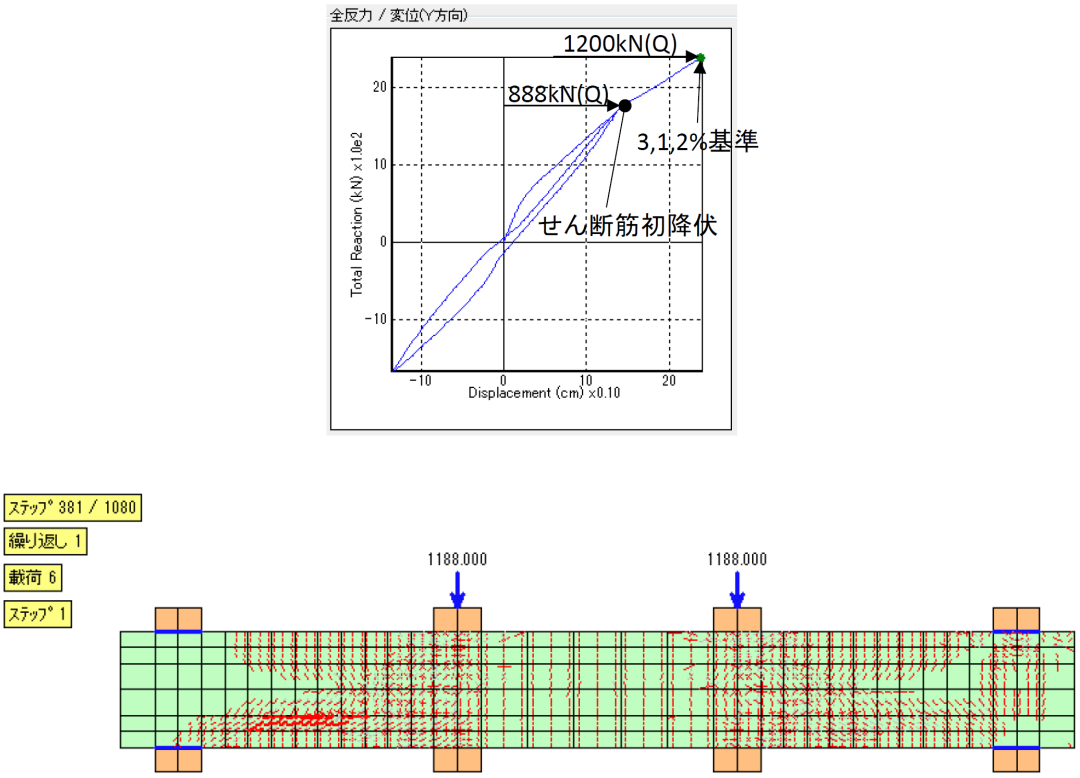
破壊基準時の最大荷重：1,235kN



第 3-3 図　ケース②－Ｂの荷重－変位関係とひび割れ状況

・ケース②－C

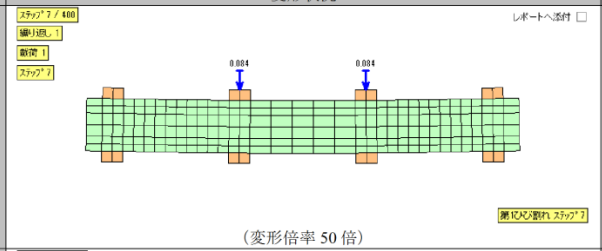
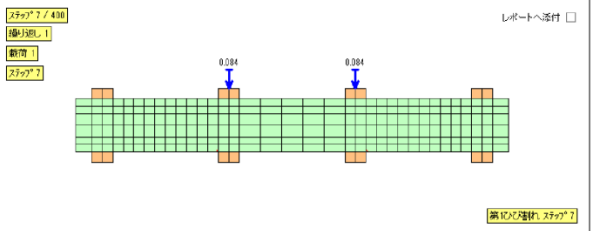
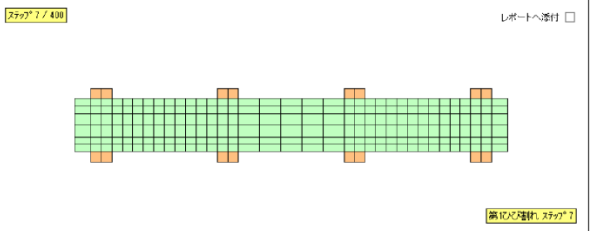
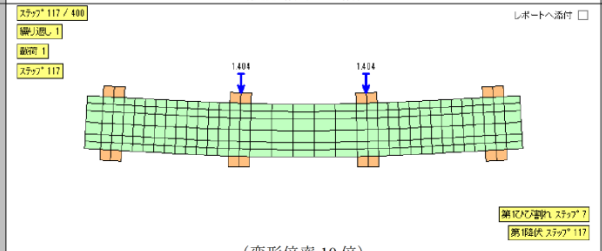
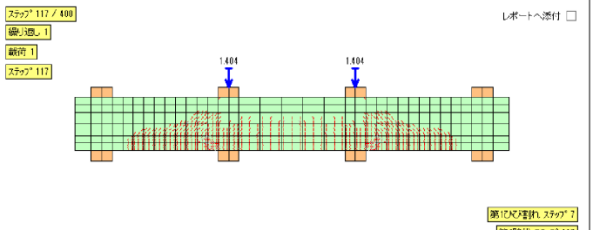
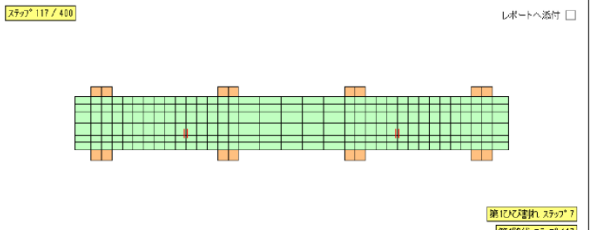
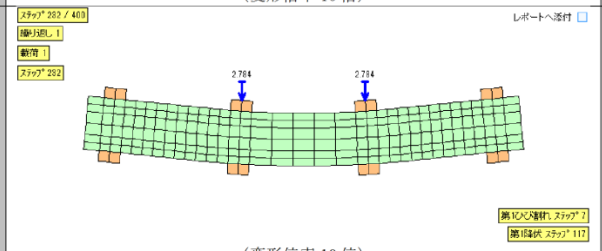
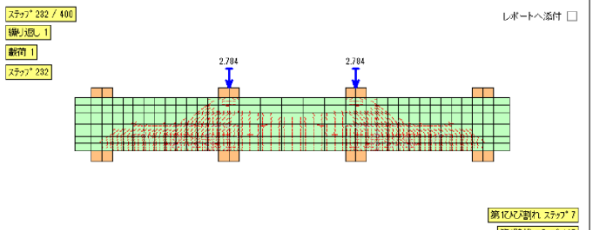
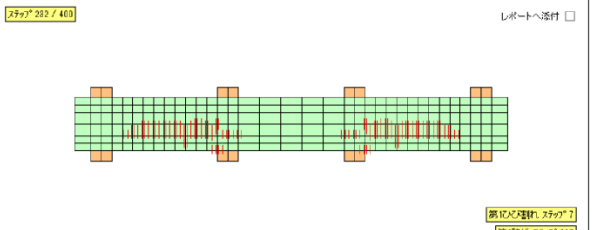
破壊基準時の最大荷重：1,200kN



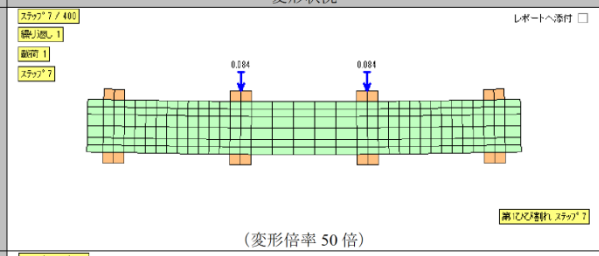
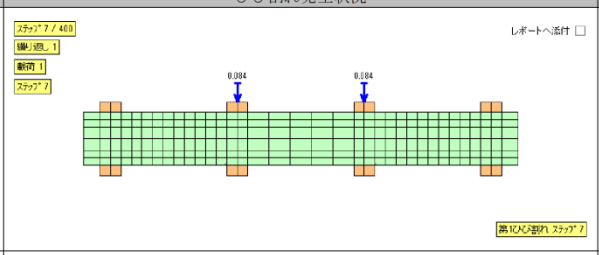
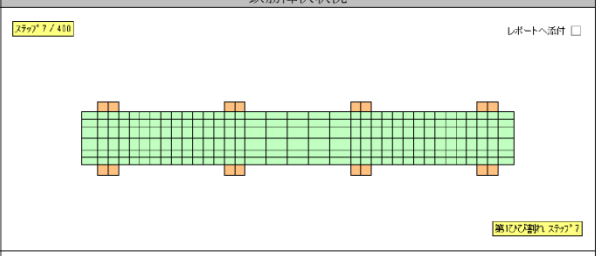
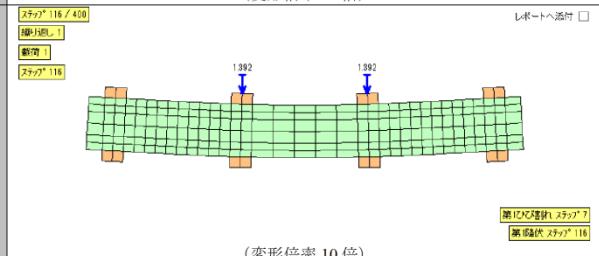
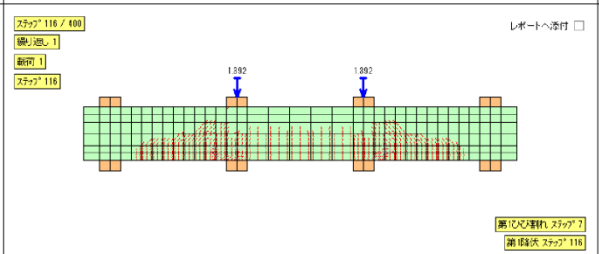
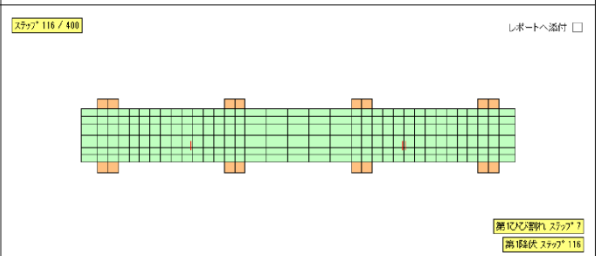
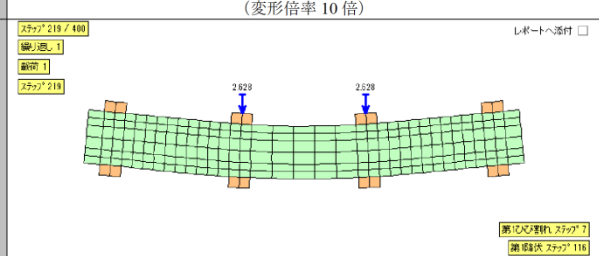
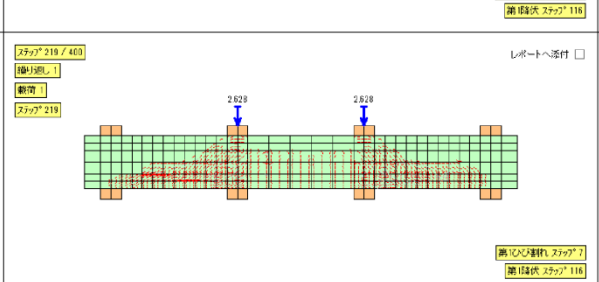
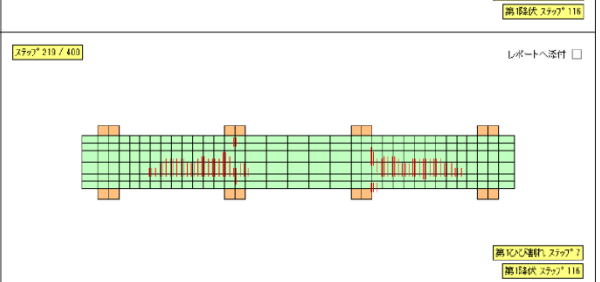
第 3-4 図　ケース②－C の荷重－変位関係とひび割れ状況

第 3-2 表　評価結果一覧

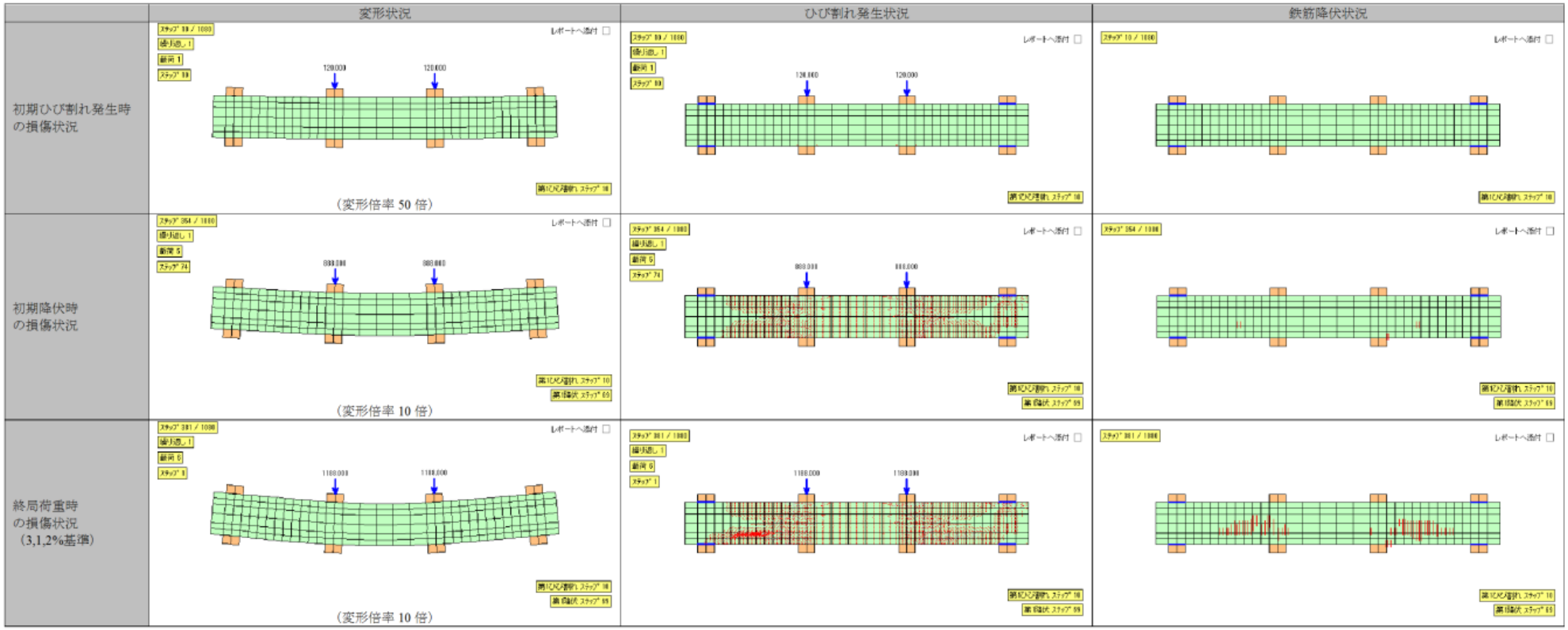
ケース	せん断耐力(kN)	在来工法と PHb 工法の比率
①－A（在来工法）	615	－
①－B	477	0.78
①－C	500	0.81
②－A（在来工法）	1,335	－
②－B	1,235	0.93
②－C	1,200	0.90

	変形状況	ひび割れ発生状況	鉄筋降伏状況
初期ひび割れ発生時の損傷状況	（変形倍率 50 倍）		
初期降伏時の損傷状況	（変形倍率 10 倍）		
終局荷重時の損傷状況（3,1,2%基準）	（変形倍率 10 倍）		

第 3-5 図　ケース②－Ａの解析結果

	変形状況	ひび割れ発生状況	鉄筋降伏状況
初期ひび割れ発生時の損傷状況	 （変形倍率 50 倍）		
初期降伏時の損傷状況	 （変形倍率 10 倍）		
終局荷重時の損傷状況（3,1,2%基準）	 （変形倍率 10 倍）		

第 3-6 図　ケース②－Ｂの解析結果

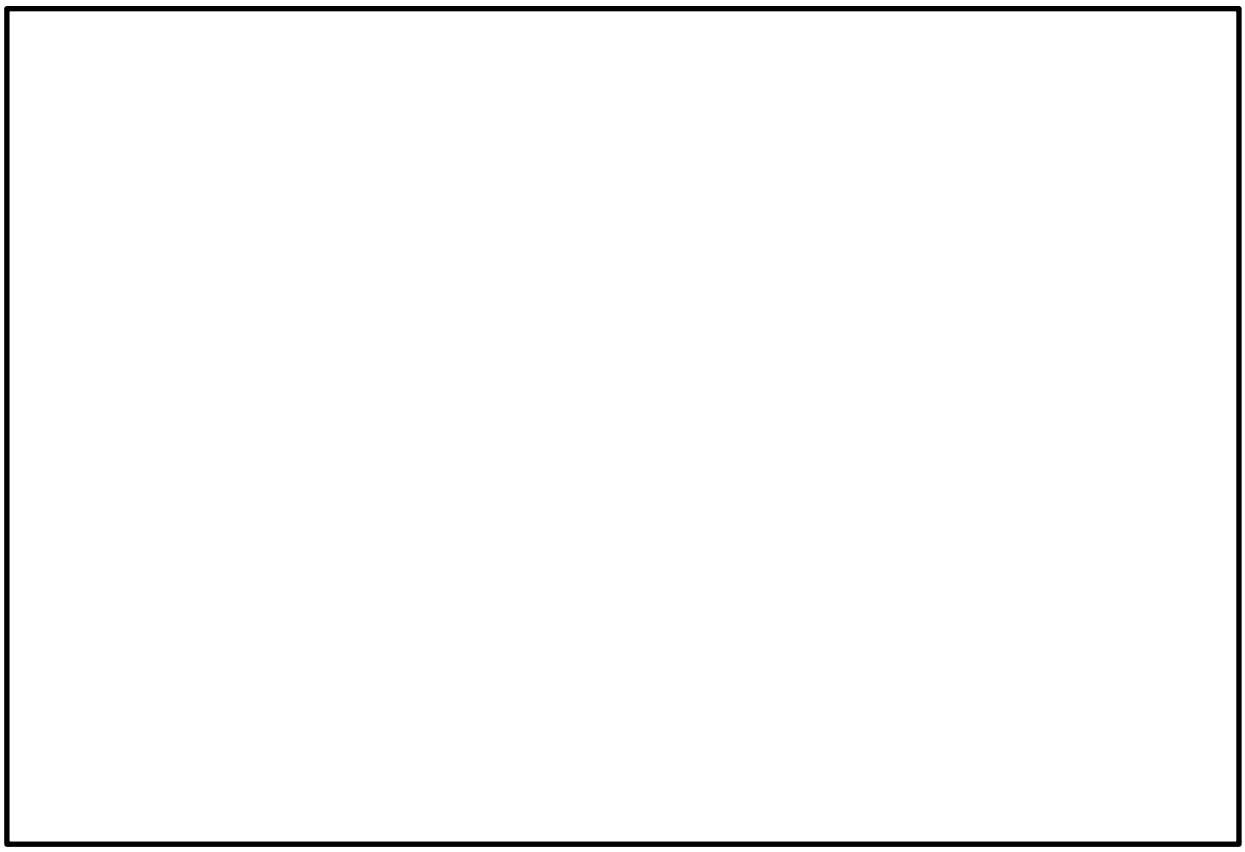


第 3-7 図　ケース②－Ｃの解析結果

4.　③の解析内容

4.1　モデル化について

「2.1　モデル化について」に準じて設定する。なお，部材諸元は島根原子力発電所２号炉取水槽の隔壁とする。対象とする部位はせん断照査結果が最も厳しくなった隔壁③を対象とする。対象とする部材を第 4-1 図に示す。この部位に設置する PHb の径は D22 である。



第 4-1 図　評価対象部材

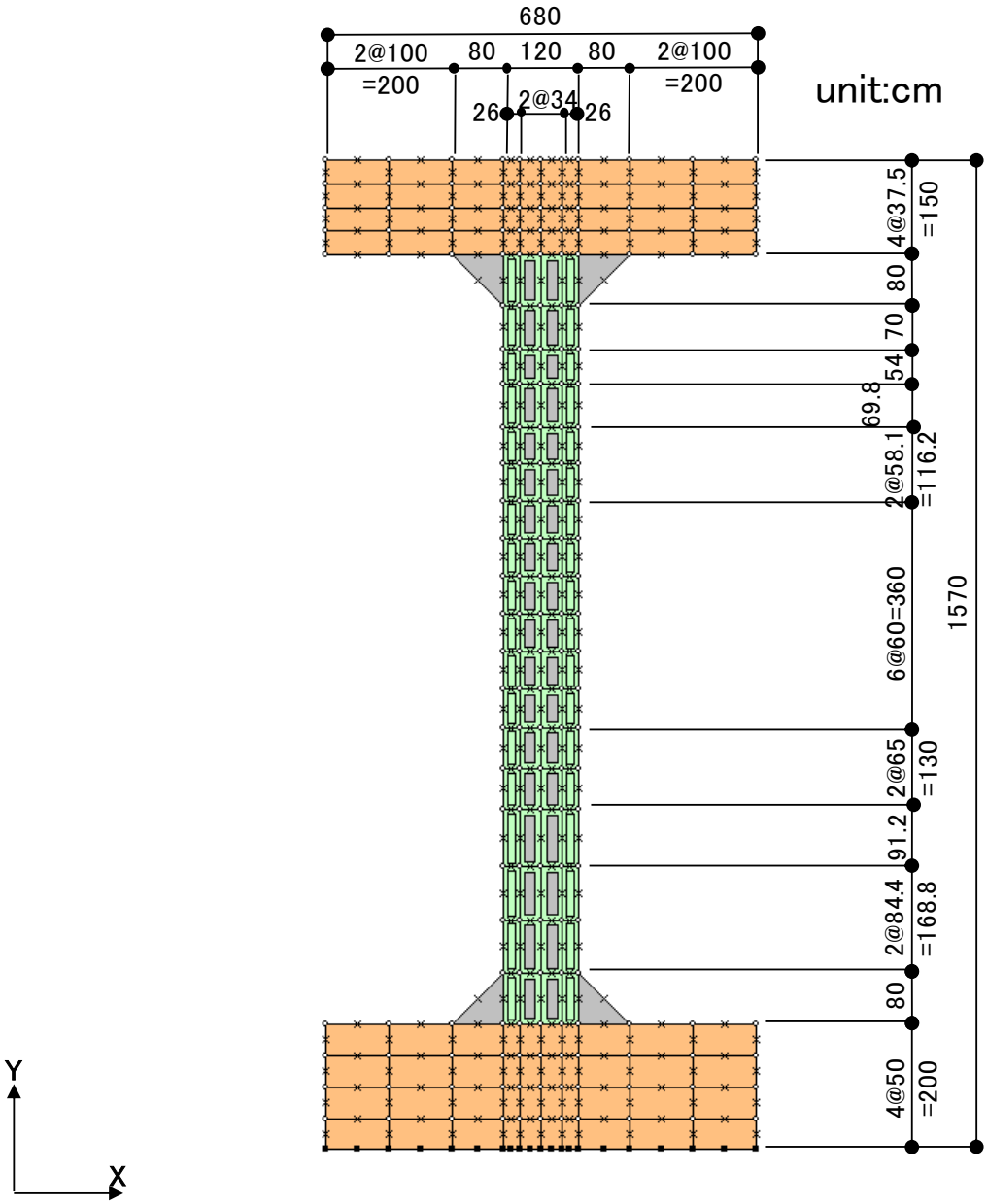
解析モデルについては，主鉄筋位置や PHb の鉄筋無効区間のモデル化を考慮して要素分割を検討する。なお，奥行き方向の厚さは 100cm とする。

部材厚さ方向の分割は４分割とする。両外側２要素は，軸方向主筋が配置されることから，芯かぶり 130mm の２倍の要素幅 260mm とし，RC 要素として設定する。

なお，要素の縦横比は 1:5 以下を目安に分割し，ハンチ部（上下部とも 800mm×800mm）は１要素とする。

解析モデル図を第 4-2 図に示す。

本資料のうち，枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。


680
2@100
=200
80
120
80
2@100
=200
2@34
26
26
unit:cm
4@37.5
=150
80
70
54
69.8
2@58.1
=116.2
6@60=360
1570
2@65
=130
91.2
2@84.4
=168.8
80
4@50
=200
Y
X

第 4-2 図　解析モデル図

解析の入力データとなるコンクリート及び鉄筋の材料特性を第4-1表及び第4-2表に示す。

ステップ②における解析モデルとステップ③における解析モデルによる違いを第 4-3 表に示す。表に示すとおり，せん断スパン比，主鉄筋比，コンクリート設計基準強度及び荷重の載荷方法についても解析により応答性状及びせん断補強効果にどの程度影響するか確認する。

第 4-1 表　コンクリートの材料特性

項目	設定値
圧縮強度 f'c	23.5N/mm^2
引張強度 ft	1.91N/mm^2（小数 2 位に四捨五入） (=0.23×24.0$^{2/3}$=1.91367)
ヤング係数 Ec	ＷＣＯＭＤで自動計算

第 4-2 表　鉄筋の材料特性

項目	設定値
主鉄筋及びせん断補強鉄筋のヤング係数	200kN/mm^2
主鉄筋の降伏強度	999N/mm^2
PHb 鉄筋の降伏強度	345N/mm^2

第 4-3 表　解析モデルの違い

項目	ステップ②	ステップ③
部材厚	1,200mm	1,200mm
せん断スパン比	2.79	11.40
主鉄筋比	1.48	0.85
コンクリート設計基準強度	32.0N/mm^2	23.5N/mm^2
載荷方法	強制変位	断面力に基づく節点力

4.2　荷重条件

考慮する荷重は，地震応答解析（部材非線形解析）から得られる断面力を考慮する。具体的には，地震応答解析（部材非線形解析）における断面力（曲げモーメント，軸力，せん断力）から得られる節点力を材料非線形解析モデルに作用させる。

材料非線形解析では，鉄筋コンクリートの非線形特性を考慮するため，当該節点力をそれぞれ 1／100 したものを漸次載荷する。

荷重ケースについては，隔壁の照査値が最も厳しくなるＳｓ－Ｎ１を対象とする。

取水槽の照査結果一覧を第 4-4 表に示す。

第 4-4 表　取水槽の照査結果一覧

基準地震動	隔壁の照査値※
Ｓｓ－Ｄ	0.37
Ｓｓ－Ｎ１	0.51
Ｓｓ－Ｎ２（ＮＳ）	0.28
Ｓｓ－Ｎ２（ＥＷ）	0.28
Ｓｓ－Ｆ１	0.26
Ｓｓ－Ｆ２	0.27

※照査値＝照査用せん断力／せん断耐力

ここで，照査用せん断力＝発生せん断力×構造解析係数

4.3　破壊判定基準

「2.3　破壊判定基準」に準じて設定する。

4.4　解析結果

検討ケースを第 4-5 表に示す。Ｓｓ－Ｎ１の地震時における在来工法によるせん断補強を想定したケースをケース③－Ａとし，PHb 工法によるせん断補強を想定したケースをケース③－Ｂとする。せん断耐力の結果を第 4-6 表に示す。ケース③－Ａのせん断耐力は 1,610kN，ケース③－Ｂのせん断耐力は 1,549kN であり，在来工法と PHb 工法の比率は約 96%となった。それぞれの結果を第 4-7 表～第 4-8 表に示す。表に示すとおり，初期ひび割れ発生時，作用荷重時のそれぞれの段階において，変形状況は在来工法と PHb 工法で顕著な差は見られず，おおむね整合的な結果となった。ひび割れ状況や鉄筋の降伏位置においても在来工法と顕著な差は見られず，ステップ①，②と同様の傾向となった。

したがって，島根原子力発電所２号炉の構造物に作用する荷重の範囲においては，在来工法と PHb 工法の間で PHb によるせん断補強効果に影響を与えるような特異な応答等は確認されなかった。参考に作用荷重を超える範囲における初期降伏時，終局荷重時における変形状況，ひび割れ状況，鉄筋降伏の状況についても第 4-7 表～第 4-8 表に示す。

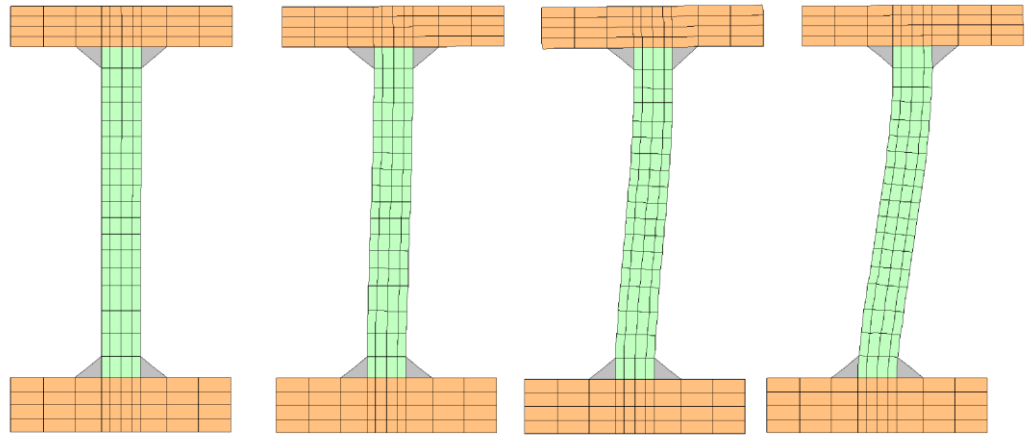
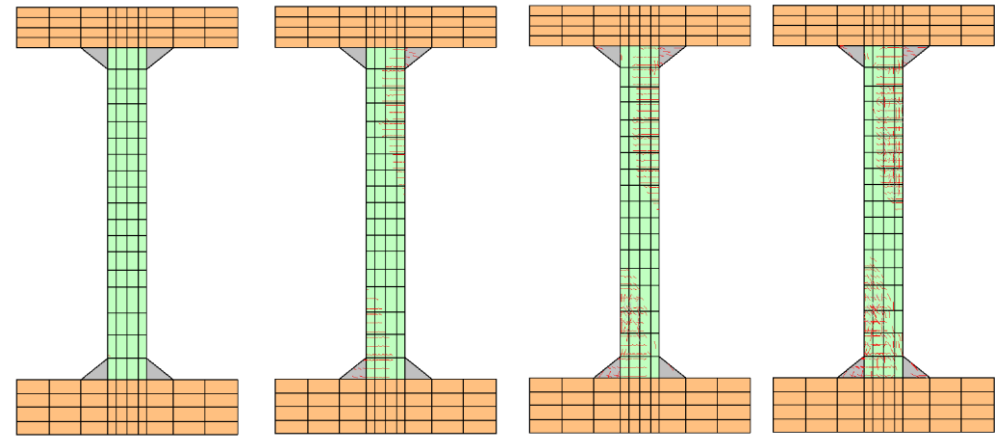
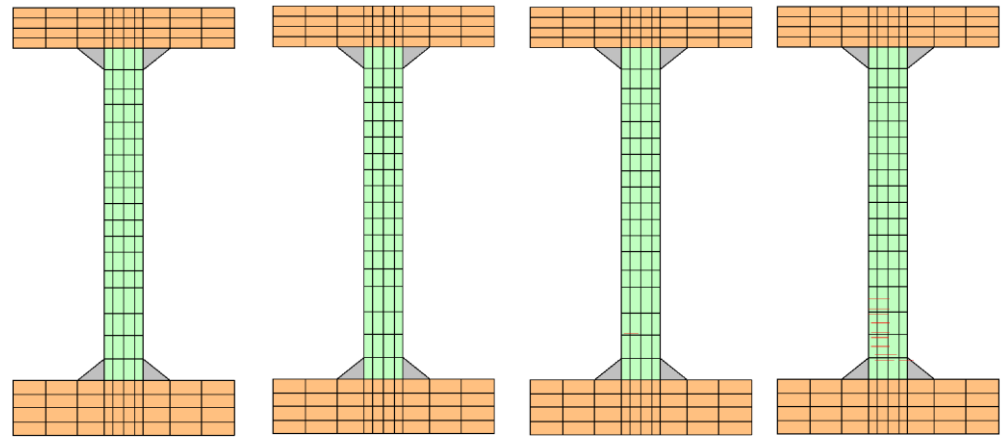
第 4-5 表　ケース一覧

ケース	地震動	せん断補強筋設置方法
③－Ａ	Ｓｓ－Ｎ１	在来工法（先施工）
③－Ｂ	Ｓｓ－Ｎ１	PHb（後施工）

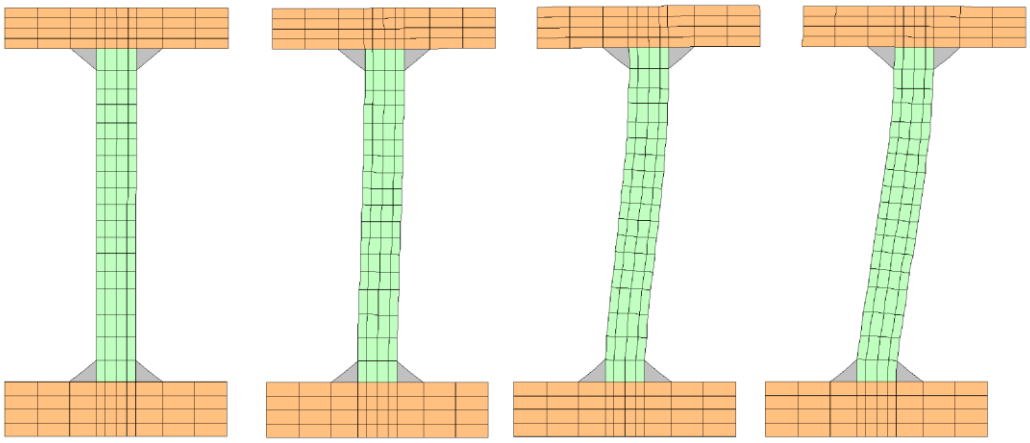
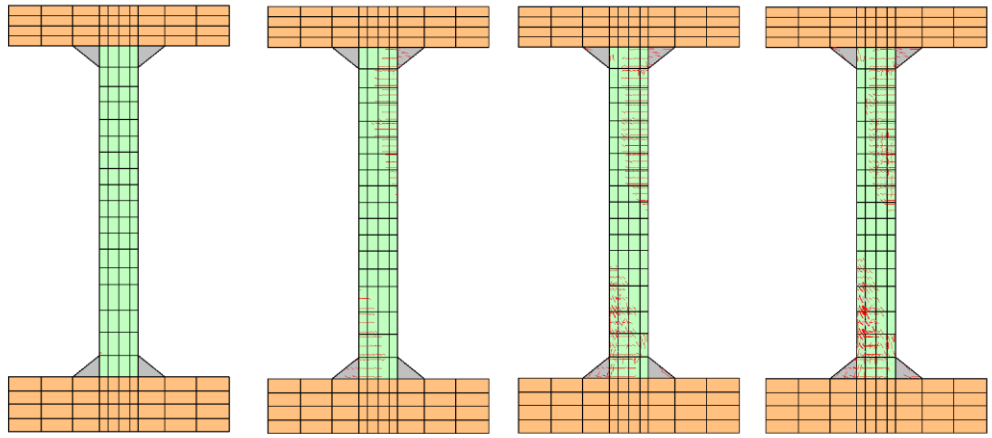
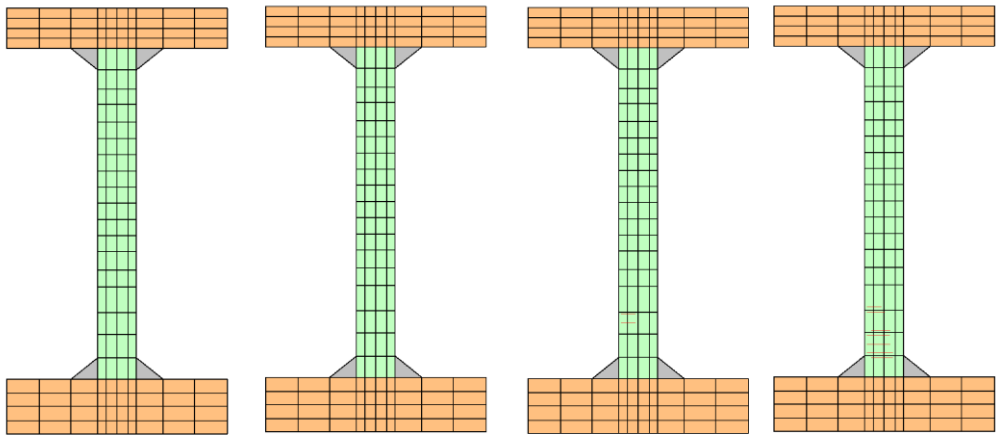
第 4-6 表　せん断耐力結果一覧

ケース	せん断耐力（kN）	在来工法と PHb 工法の比率
①－Ａ（在来工法）	615	－
①－Ｂ	477	0.78
①－Ｃ	500	0.81
②－Ａ（在来工法）	1,335	－
②－Ｂ	1,235	0.93
②－Ｃ	1,200	0.90
③－Ａ（在来工法）	1,610	－
③－Ｂ	1,549	0.96

第 4-7 表　ケース③－Ａの解析結果

変形状況	 (a)　初期ひび割れ発生時（STEP21）　(b)　作用荷重時（STEP100）　(c)　初期降伏時（STEP198）　(d)　終局荷重時（STEP264）
ひび割れ発生状況	 (a)　初期ひび割れ発生時（STEP21）　(b)　作用荷重時（STEP100）　(c)　初期降伏時（STEP198）　(d)　終局荷重時（STEP264）
鉄筋降伏状況	 (a)　初期ひび割れ発生時（STEP21）　(b)　作用荷重時（STEP100）　(c)　初期降伏時（STEP198）　(d)　終局荷重時（STEP264）

第 4-8 表　ケース③－Ｂの解析結果

変形状況				
	(a)　初期ひび割れ発生時（STEP21）	(b)　作用荷重時（STEP100）	(c)　初期降伏時（STEP221）	(d)　終局荷重時（STEP254）
ひび割れ発生状況				
	(a)　初期ひび割れ発生時（STEP21）	(b)　作用荷重時（STEP100）	(c)　初期降伏時（STEP221）	(d)　終局荷重時（STEP254）
鉄筋降伏状況				
	(a)　初期ひび割れ発生時（STEP21）	(b)　作用荷重時（STEP100）	(c)　初期降伏時（STEP221）	(d)　終局荷重時（STEP254）

5. まとめ

ステップ①～③における材料非線形解析を用いて，島根原子力発電所２号炉の屋外重要土木構造物における PHb 工法の適用性の確認を実施した。解析の結果，建設技術審査証明報告書の実験を上回る部材厚に対しても応答性状に変化はないことが確認できた。また，実構造物諸元相当の解析により，PHb 工法のせん断補強効果に影響を及ぼすと考えられる項目が建設技術審査証明報告書における実験条件と異なっていても，応答性状に変化はなく，建設技術審査証明報告書で確認したとおりのせん断補強効果を期待できることを確認した。

添付資料３

中国電力株式会社
島根原子力発電所

施工管理要領書（案）
（取水槽耐震補強工事（ポストヘッドバー工法））

中国電力株式会社

目次

頁
1. 目的 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 92

2. 準拠事項 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 92

3. 工事の管理 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 92

4. 耐震補強工事 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 92
4.1 後施工プレート定着型せん断補強鉄筋の種類及び品質 ・・・・・ 92
4.2 注入材の種類及び品質 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 92
4.3 断面修復材の種類及び品質 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 92
4.4 品質管理及び検査 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 92

5. 施工要領 ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 95
5.1 施工フロー ・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・・ 95

1. 目的

本指針は，島根原子力発電所２号炉取水槽耐震補強工事に当たり，補強する構造物が技術基準等に適合した材料及び構造を有するように施工管理を行うために，中国電力株式会社が定めた管理方法，判断基準等の大綱を示したものである。

2. 準拠事項

施工及び施工管理は，本要領書によるほか下記の基準等に準じて行う。

(1) 日本工業規格（以下「JIS」という。）

(2) 土木学会「コンクリート標準示方書」（以下「コンクリート標準示方書」という。）

(3) 建設技術審査証明報告書（建技審証　第 0522 号）（以下「建設技術審査証明報告書」という。）

3. 工事の管理

施工及び施工管理に先立ち，作業要領書を確認したうえで本工事の管理を行う。

4. 耐震補強工事

4.1　後施工プレート定着型せん断補強鉄筋の種類及び品質

本工事に用いる後施工プレート定着型せん断補強鉄筋（Post-Head-bar）（以下「PHb」という）は，JIS，建設技術審査証明報告書の規格に適合するものとする。PHb の品質は，建設技術審査証明報告書に要求される所要の性能を有するものとする。

4.2　注入材の種類及び品質

注入材は，建設技術審査証明報告書の規格に適合するものとする。注入材の品質は，建設技術審査証明報告書に要求される所要の性能を有するものとする。

4.3　断面修復材の種類及び品質

断面修復材は，建設技術審査証明報告書の規格に適合するものとする。断面修復材の品質は，建設技術審査証明報告書に要求される所要の性能を有するものとする。

4.4　品質管理及び検査

耐震補強工事における各種検査は，第 4-1 表により行い，判定基準に適合していることを確認する。

第 4-1 表　後施エプレート定着型せん断補強鉄筋（PHb）品質，出来形及び検査一覧（1／2）

工　程	項　目	管理項目	管理水準	判定基準	検査方法	管理時期
機材・資材搬入	PHb	材料	・矩形プレートの科学的性質，機械的性質は JIS G3106 規格のうち SM490A（又は同等品（SM490B，SM490C））の適合品であること。 ・円形プレートの科学的性質，機械的性質は JIS G4051 規格のうち S35C 若しくは S45C の適合品であること。 ・定着筋の科学的性質，機械的性質は JIS G3112 の適合品であること。		ミルシート	材料搬入時
		外観・寸法検査	・各プレートの形状，寸法が，JIS G3194 に適合していること。		PHb 出来形検査表	材料搬入時
			・圧接位置がメーカーの定める基準値内であること。			
			・鉄筋仕上がり長さがコンクリート標準示方書「施工編」『7.3 鉄筋工の検査』の基準に適合していること。			
		引張強度試験	・引張強度は，矩形プレート側摩擦接合部の引張強度が鉄筋の引張強度以上であること。		試験成績表	材料搬入時
	注入材	材料	・PHb ﾓﾙﾀﾙ-N 又は同等品であること。		試験成績書	材料搬入時
	断面修復材	材料	・RS ﾓﾙﾀﾙ-P 又は同等品であること。		試験成績書	材料搬入時
削孔	削孔	削孔径	・削孔径が設計図どおりであること。 PHb 工法研究会の定める管理値	設計値以上	コンベックス ノギス	削孔完了後
		削孔深さ	・削孔深さが設計図どおりであること。 PHb 工法研究会の定める管理値	-10mm～+20mm	コンベックス ノギス	削孔完了後

第 4-1 表　後施エプレート定着型せん断補強鉄筋（PHb）品質，出来形及び検査一覧（2／2）

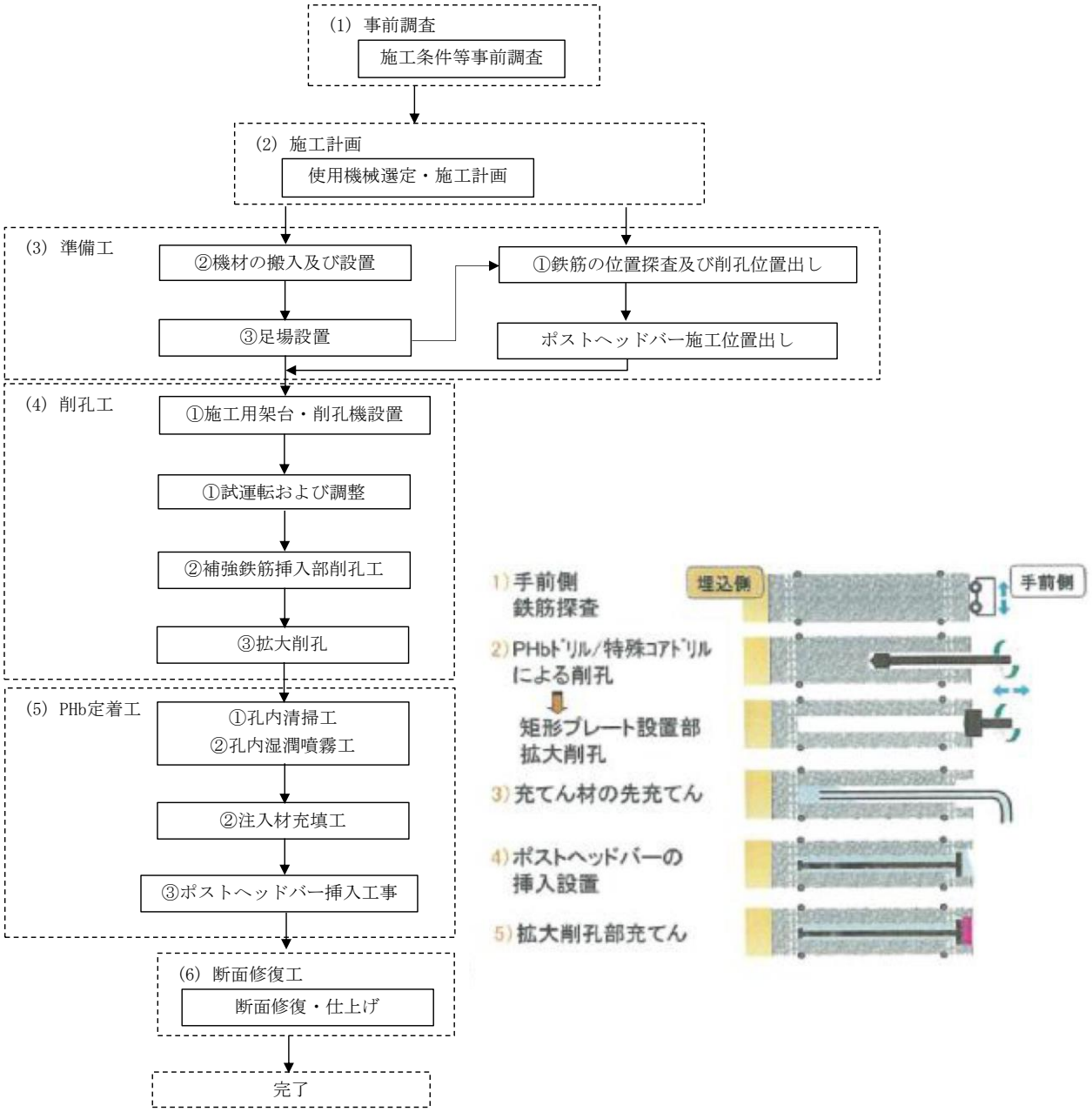
工　程	項　目	管理項目	管理水準	判定基準	検査方法	管理時期
PHb 挿入	かぶり	かぶり	・かぶりが設計図どおりであること。 PHb 工法研究会の定める管理値	設計かぶり以上	コンベックス，ノギス	設置後
定着	注入材	フレッシュ時の性状	・フローが PHb 工法研究会の定める管理値内であること。	190mm±20mm	フロー試験	注入前
		材料温度	・材料温度が５℃以上であること。		温度計	注入前
		圧縮強度試験	・躯体コンクリートの設計強度以上であること。	σck=24N/mm^{2}以上	圧縮強度試験	打設後 28 日
	断面修復材	フレッシュ時の性状	・フローが PHb 工法研究会の定める管理値内であること。	150mm±20mm	フロー試験	注入前
		材料温度	・材料温度が５℃以上であること。		温度計	注入前
		圧縮強度試験	・躯体コンクリートの設計強度以上であること。	σck=24N/mm^{2}以上	圧縮強度試験	打設後 28 日

注）引用資料・・・コンクリート標準示方書「施工編」（土木学会），建設技術証明報告書後施工プレート定着型せん断補強鉄筋「Post-Head-bar」

5. 施工要領

5.1 施工フロー

施工フローを第 5-1-1 図に示す。



第 5-1-1 図　施工フロー

5.1.1　事前調査

様々な既存設備の存在が施工や資機材の搬入に対する制約となる場合がある。したがって，施工条件を把握する為に，施工に先立ち事前調査を行う。

事前調査を実施して現状を把握した結果，既存設備が施工上の制約になる場合には，当社と事前にその対策について協議する。

5.1.2　施工計画（使用機器選定）

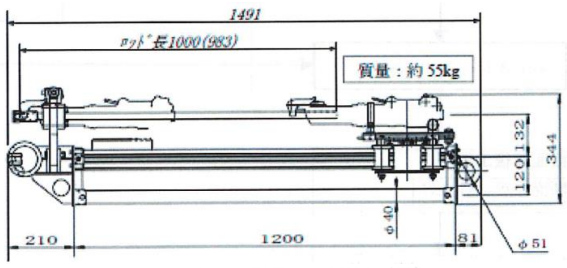
既存設備に関する協議結果に基づいて施工計画を立案し，適切な施工機械や削孔方法を選定する。第 5-1-2-1 図に主な削孔機器として PHb ドリルと特殊コアドリルを示す。

削孔には PHb ドリルを用いることを標準とする。ただし，施工スペースが狭い場合や鉄筋が輻輳することが多いはり部やハンチ部の施工では特殊コアドリルを使用する。

PHb ドリルは，ビットの回転と打撃で削孔する機械であり，圧縮空気により作動する。特殊コアドリルは，コアビットを低トルクで高速回転させることにより，既存鉄筋などに接触した場合に瞬時にコアドリルの回転が停止する機能を備えた削孔機械であり，電力により作動する。

なお，孔と鉄筋の干渉を避けて再削孔を行う際，削岩機ベースの PHb ドリルでは孔をラップさせることができないため再削孔位置の選定が制限され，再削孔しても新たに別の鉄筋に干渉してしまう可能性がある。そこで，孔のラップが可能な PHb 工法指定の特殊コアドリルを必要に応じて併用することとし，再削孔時の精度向上を図る。





c) ベンチャードリルの諸元（例）

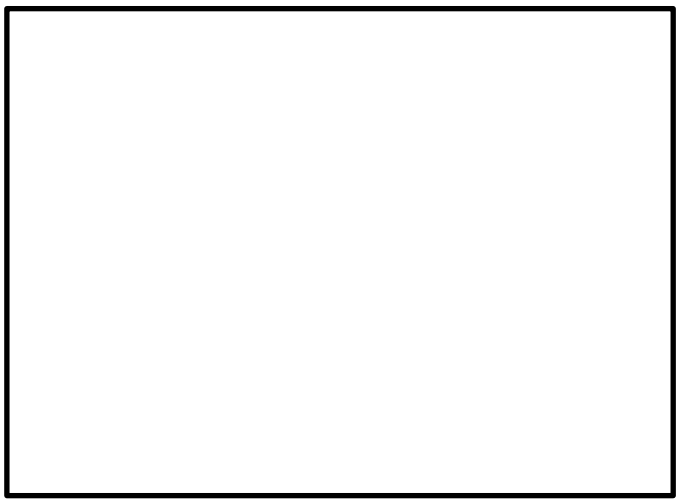
第 5-1-2-1 図　削孔機械の種類

本資料のうち，枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

5.1.3　準備工

(1)鉄筋位置探査及び削孔位置出し

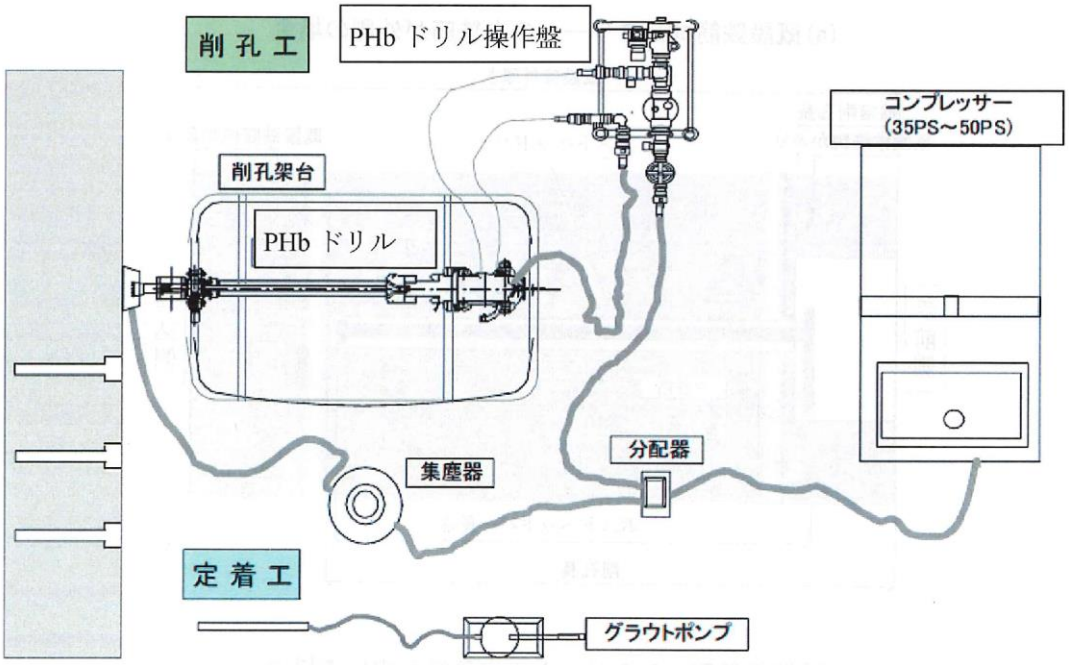
事前に PHb の設計位置を墨出し,内空側既存鉄筋の位置を鉄筋探査装置により調査する。調査結果をもとに,内空側既存鉄筋位置と PHb の設計位置とを確認し,PHb の施工位置を決定する。第 5-1-3-1 図に鉄筋探査の概要を示す。



第 5-1-3-1 図　鉄筋探査工

(2)機材の搬入及び配置

第 5-1-3-2 図に主な機材とその配置を示す。



第 5-1-3-2 図　機材配置図

本資料のうち，枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

(3) 足場設置

高所作業の場合など施工位置に応じて必要な足場設備を設置する。

5.1.4 削孔工

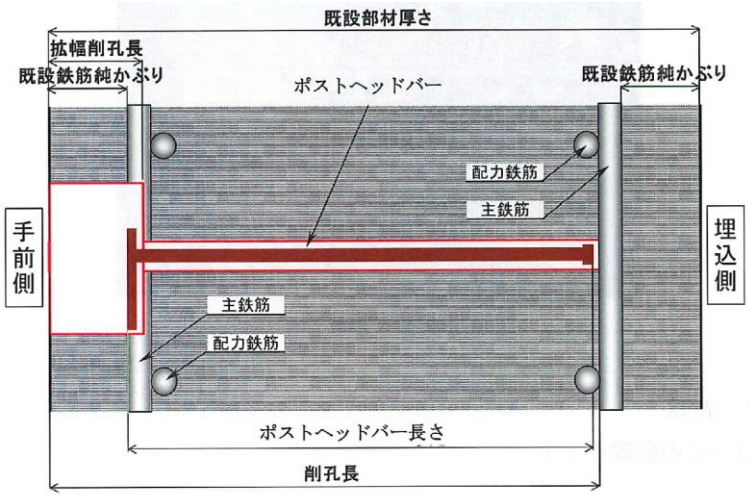
第 5-1-4-1 図に示すように，PHb の施工では下記の削孔深さを原則とする。

・補強鉄筋挿入部の削孔長

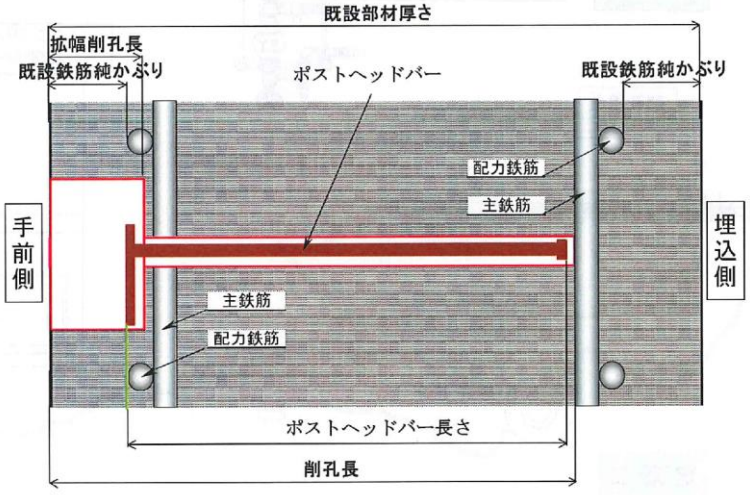
手前側削孔表面から埋込側既設主鉄筋の手前側までの距離

・矩形プレート部の拡幅削孔長

PHb の矩形プレートのかぶりが手前側既設鉄筋のかぶりと等しくなるように設置した時，手前側削孔表面から矩形プレートの埋込側の面より 5 mm 内側までの距離



(a) 既設鉄筋コンクリートの主鉄筋が外側の場合



(b) 既設鉄筋コンクリートの主鉄筋が内側の場合

第 5-1-4-1 図　PHb 工法の施工概要図

(1)施工用架台・削孔機設置及び試運転・調整

PHb ドリル施工用架台を使用し，PHb ドリルを削孔位置にあわせる。ドリルの鉛直方向，水平方向が削孔面に対して垂直となるようスラントルール，金尺等で確認しながら設置する。

第 5-1-4-2 図に施工用架台に設置した PHb ドリルと鉛直･水平の確認状況を示す。



第 5-1-4-2 図　削孔準備工

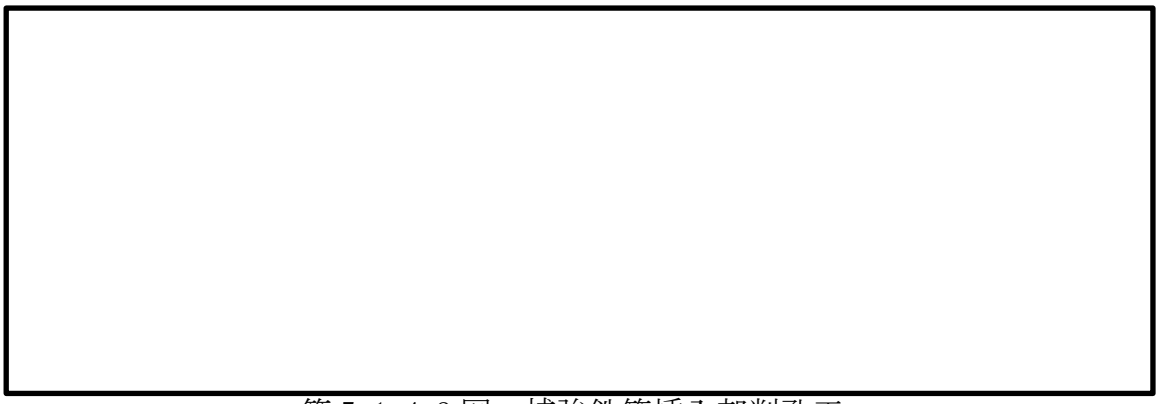
(2)補強鉄筋挿入部削孔工

水平削孔時は，粉塵の吸出し方向が横向きあるいは下向きとなるように，下向き削孔時は,粉塵の吸出し方向が横向きとなるように集塵装置を削孔位置にセットする。

PHb ドリルで補強鉄筋挿入部を所定の深さまで削孔する。所定の深さは原則として「5.1.4 削孔工」に図示した寸法とし，削孔深さの誤差は-10㎜～+20㎜ とする。

埋込側既存鉄筋を切断しないように，埋込側鉄筋位置の手前から，削孔スピード，回転速度を落として慎重に削孔する。削孔完了後に削孔深さを測定する。万が一埋込側既存鉄筋に当たった場合は，ドリルを即時停止する。もし削孔深さの管理値を超える場合は，付近の位置で再削孔する。

第 5-1-4-3 図に補強鉄筋挿入部削孔状況を示す。



第 5-1-4-3 図　補強鉄筋挿入部削孔工

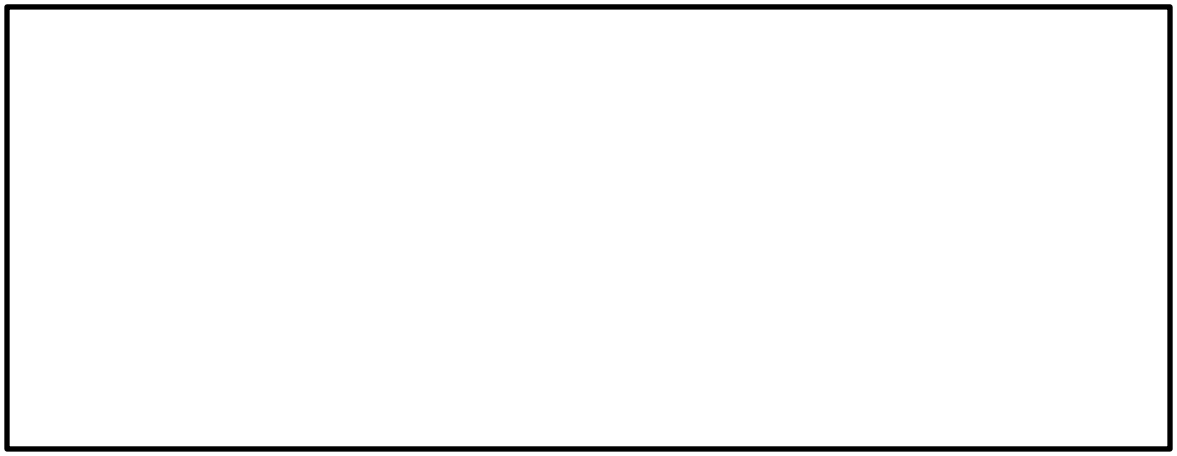
本資料のうち，枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

(3)拡大削孔工

拡大削孔用のビット及び集塵装置に取換え，所定の深さまで拡大削孔を行う。所定の深さは，原則として「5.1.4 削孔工」に示した寸法とする。

手前側既存鉄筋を切断しないように,鉄筋探査により測定した手前側既存鉄筋のかぶりの手前から削孔スピード,回転速度を落として慎重に削孔する。万が一手前側既存鉄筋に当たった場合は，ドリルを即時停止する。PHb の矩形プレートのかぶりが既存鉄筋の設計かぶりを確保できない場合は付近の位置で再削孔する，または防錆処理を実施するかを協議する。

第 5-1-4-4 図に拡大部削孔状況を示す。



第 5-1-4-4 図　拡大削孔工

5.1.5 PHb 定着工

PHb 定着工においては，横向き施工・下向き施工ともに，可塑性を有する PHb モルタルを使用することを標準とする。PHb モルタルは，施工性・充填性に優れており，孔内の埋込側先端まで隙間無く充填することができる。

(1)孔内清掃工

孔内湿潤噴霧工に先立ち,バキュームクリーナーを用いて,削孔が完了した孔内の清掃を行う。

(2)孔内湿潤噴霧工

水分の逸失による注入材の粘性増加に起因して,PHb の挿入が困難あるいは不可能になることを未然に防止するために,孔内への注入材充填に先立ち,孔内の湿潤処理を行う。

第 5-1-5-1 図に孔内清掃工及び孔内湿潤噴霧工の概要を示す。

本資料のうち，枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。



第 5-1-5-1 図　孔内清掃工及び孔内湿潤噴霧工

(3)注入材充填工

ペール缶に所定の水を計量し,ハンドミキサーで攪拌しながら所定量の注入材料（プレミックス品）を加えて練り混ぜる。

空隙を生じさせないように孔内先端まで注入ホースを差込み, PHb 定着用の注入材を電動ポンプで注入する。

第 5-1-5-2 図に注入材充填工の概要を示す。



第 5-1-5-2 図　注入材充填工

本資料のうち，枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

(4)PHb 挿入工

注入材で満たされた孔内に PHb を所定の位置まで人力で挿入し,余分な注入材を取り除く。

PHb の挿入後，PHb の位置ずれを防止するために手前側矩形定着プレートを抑え冶具で固定する。

第 5-1-5-3 図に PHb 挿入工の概要を示す。



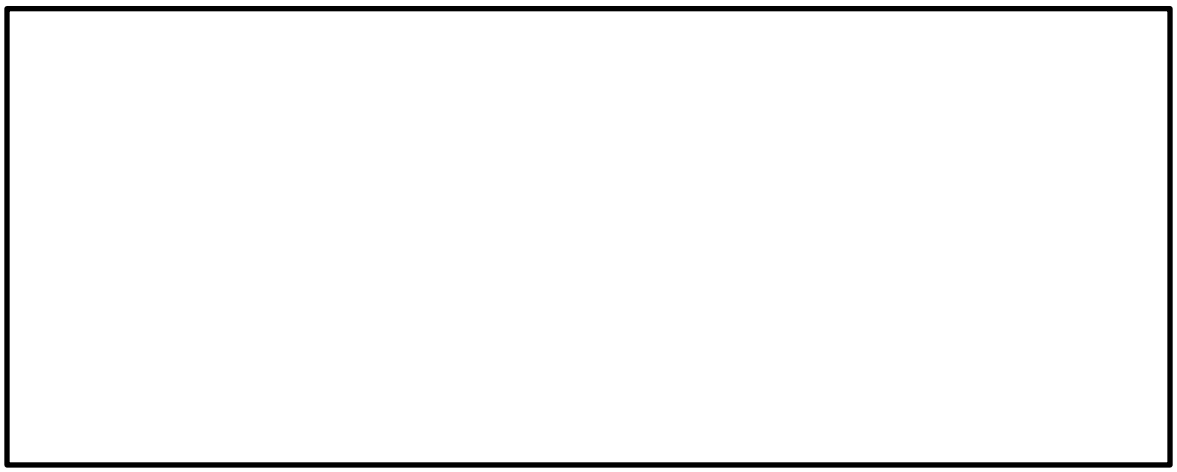
第 5-1-5-3 図　PHb 挿入工

5.1.6　断面修復工

ペール缶に所定の水を計量し，ハンドミキサーで攪拌しながら所定量の断面修復材（プレミックス品）を加えて練り混ぜる。

拡大削孔部を断面修復材で充填する。断面修復材の充填はモルタル・グラウトの硬化後に行う。金ごてにより表面仕上げを行う。

第 5-1-6-1 図に拡大削孔部の断面修復の状況写真を示す。



第 5-1-6-1 図　断面修復工

本資料のうち，枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

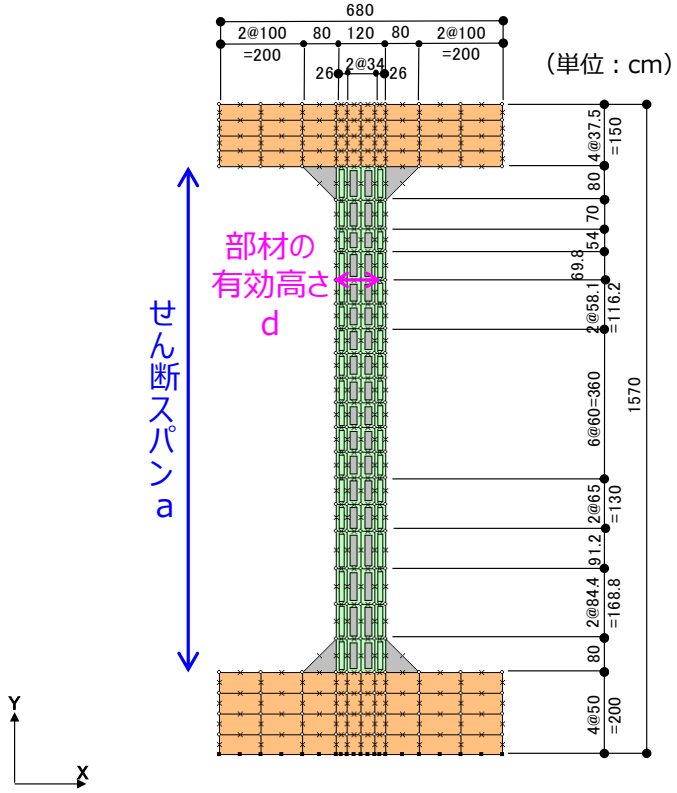
添付資料４

建設技術審査証明報告書の実験条件を超えるせん断スパン比に対する PHb の適用性について

1.　はじめに

島根２号炉の PHb 工法の適用性確認では，建設技術審査証明報告書の実験条件と差異がある部材諸元や載荷方法について，先行サイト（美浜３号炉及び東海第二）と同様，解析によりせん断補強効果が期待できることを確認した。

ここでは，せん断スパン比に着目し，建設技術審査証明報告書の実験条件を超えるせん断スパン比 11.40 の鉄筋コンクリート部材について，PHb 工法によるせん断補強効果が期待できる理由を，一般的な部材のせん断の原理を踏まえて考察した。

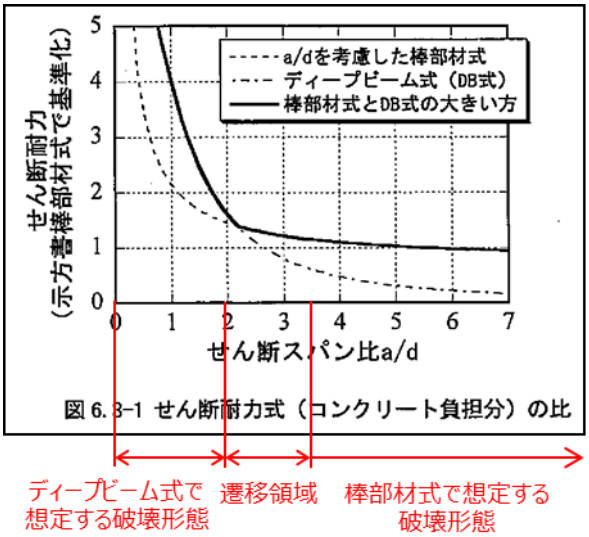


第 1-1 図　せん断スパン比（a／d）の考え方

（島根２号炉取水槽（スクリーン室）隔壁の材料非線形解析モデル）

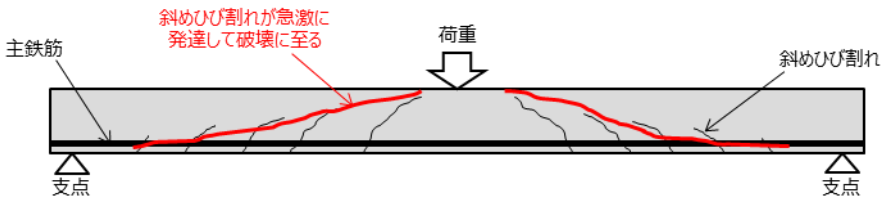
2.　一般的な鉄筋コンクリート部材のせん断の原理

「原子力発電所屋外重要土木構造物の耐震性能照査指針・マニュアル（土木学会，2005)」によれば，鉄筋コンクリート部材のせん断破壊の形態は，第 2-1 図に示すとおり，せん断スパン比が 3.5 以上であれば「棒部材式で想定する破壊形態」となり，せん断スパン比が 2 以下であれば「ディープビーム式で想定する破壊形態」になるとされる。せん断スパン比が 2～3.5 の場合は両者の遷移領域であり，一般的には両者が生じうる。



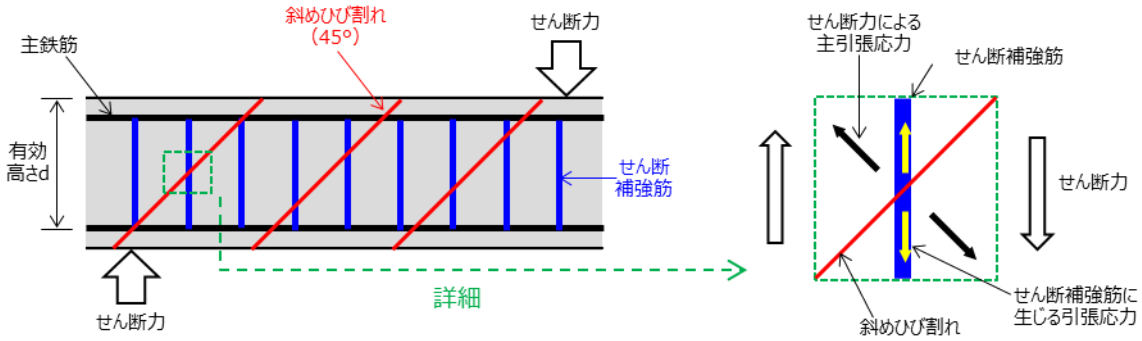
第 2-1 図　せん断スパン比とせん断破壊形態の関係性
（「原子力発電所屋外重要土木構造物の耐震性能照査指針・マニュアル（土木学会，2005)」に赤色で加筆）

島根 2 号炉取水槽（スクリーン室）隔壁は，せん断スパン比が 11.40 であることから，「棒部材式で想定する破壊形態」となる。「棒部材式で想定する破壊形態」では，第 2-2 図に示すとおり，斜めひび割れが急激に載荷点方向及び支点方向に向かって発達し，それとほぼ同時に耐力を失ってせん断破壊に至る。



第 2-2 図　棒部材式で想定するせん断破壊形態のイメージ

棒部材に発生するせん断力による斜めひび割れの角度は，第 2-3 図に示すとおり，コンクリート標準示方書をはじめとする基準類に示されるトラス理論により 45° として評価され，せん断補強筋を部材有効高さの 1／2 以下の間隔で配置すれば，斜めひび割れ面とせん断補強筋が必ず交差して補強効果が発揮されることが一般に分かっている。



第 2-3 図　せん断力による斜めひび割れとせん断補強筋による
補強効果のイメージ

3.　PHb 工法によるせん断補強効果

PHb 工法においても，建設技術審査証明報告書によれば，先施工と同様，トラス理論により評価されるせん断補強効果が発揮できるとされている。せん断スパン比 2.79 のはり試験体の実験結果では，おおむね 45° の斜めひび割れが急激に発達してせん断破壊に至る棒部材的な破壊形態を示すとともに，理論式で算定されるせん断耐力が得られている。

よって，せん断スパン比が 11.40 である島根２号炉取水槽（スクリーン室）隔壁においても，せん断補強筋を部材有効高さの 1／2 以下の間隔で配置することから，先施工の原理と同様にせん断補強効果が発揮されると判断した。



（a）はり試験体のせん断補強仕様



（b）破壊時のひび割れ状況

第 3-1 図　せん断スパン比 2.79 のはり試験体の実験結果
（建設技術審査証明報告書より抜粋）

本資料のうち，枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

4.　せん断スパン比 11.40 の部材への PHb 工法の適用性確認方法及び結果

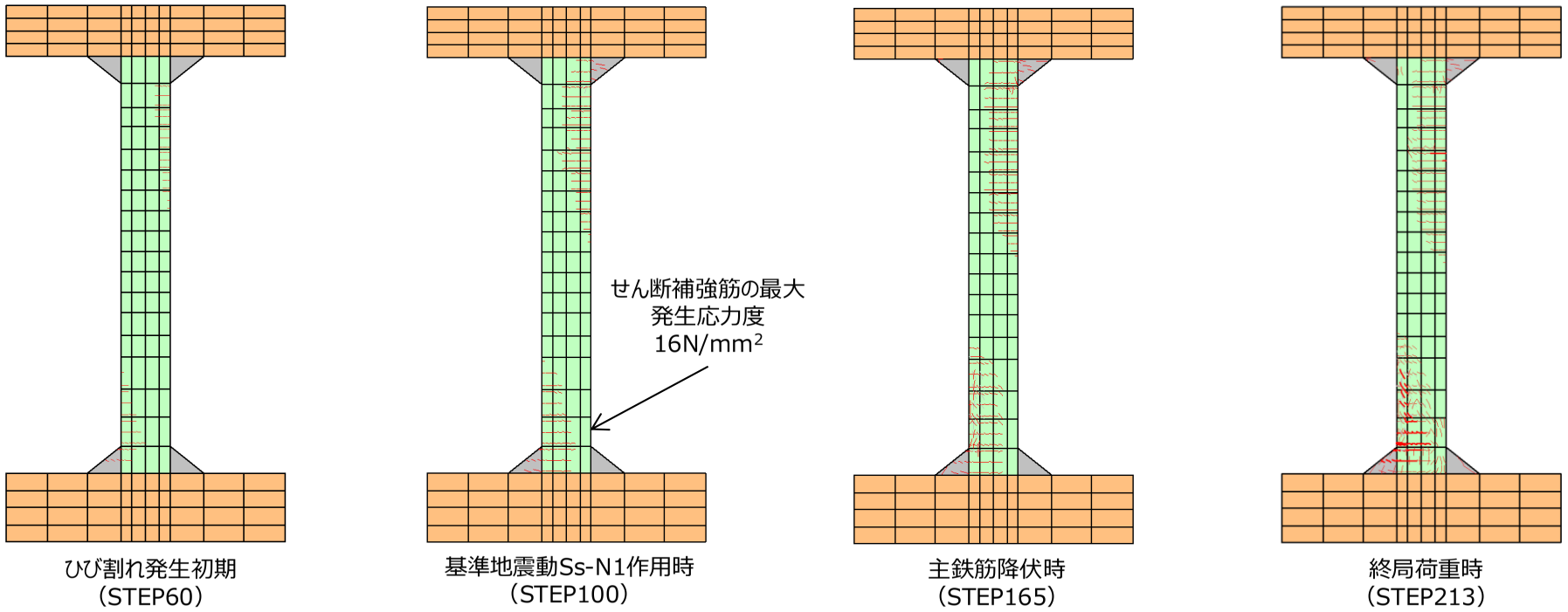
前述の考察について，島根２号炉取水槽（スクリーン室）隔壁の材料非線形解析により確認した。

材料非線形解析は，添付資料２の第 4-2 表で示したステップ③の解析条件のうち，主鉄筋の降伏強度を 345N/mm^2 として隔壁の照査値が最も厳しかった基準地震動Ｓｓ－Ｎ１による荷重を作用させた。

解析結果から，第 4-1 図に示すとおり，せん断補強筋の発生応力度は最大でも 16N/mm^2 であり，せん断補強筋は降伏強度が 345N/mm^2 であることから降伏しておらず，補強効果が発揮されていることを確認した。

さらに，作用荷重を超える荷重を作用させた結果，主鉄筋降伏時及び終局荷重時のひび割れ状況においても，棒部材式で想定する破壊形態である斜めひび割れの発生は認められず，せん断破壊が生じていないことを確認した。

以上のことから，建設技術審査証明報告書の実験条件を超えるせん断スパン比 11.40 の部材について，せん断の原理に基づく補強効果が発揮されており，PHb の適用性があると判断する。



第 4-1 図　取水槽（スクリーン室）隔壁の材料非線形解析結果（ひび割れ状況）

別紙－14

島根原子力発電所２号炉

地震時における燃料被覆管の閉じ込め機能の維持について

目　　次

1.　はじめに
2.　基本方針
2.1　要求事項の整理
2.2　追加要求事項への適合性に係る設計方針
3.　追加要求事項に係る評価項目の選定
4.　地震時の燃料被覆管閉じ込め機能評価方針
5.　追加要求事項を踏まえた燃料被覆管応力評価条件
6.　評価手法
6.1　応力評価手法
6.2　疲労評価手法
7.　評価結果
8.　まとめ

添付資料１：燃料被覆管の応力評価に考慮する応力について
添付資料２：燃料被覆管下部端栓溶接部における応力の取扱いについて
添付資料３：地震による応力を考慮した燃料被覆管応力評価（閉じ込め機能の維持）について
添付資料４：地震による繰り返し荷重を考慮した燃料被覆管疲労評価（閉じ込め機能の維持）について
添付資料５：燃料被覆管応力評価における許容応力について
添付資料６：燃料被覆管応力評価におけるモンテカルロ法による統計処理について
添付資料７：下部端栓溶接部の応力評価に使用する有限要素法解析コードについて
添付資料８：９×９燃料（B 型）における地震時鉛直方向加速度の考慮方法について
添付資料９：評価部位の選定理由について
添付資料 10：燃料被覆管の応力評価に用いる各評価手法の保守性について
添付資料 11：改正規則の影響について
添付資料 12：燃料集合体に対する鉛直地震動の影響について
添付資料 13：ＭＯＸ燃料の被覆管応力評価結果について

1.　はじめに

燃料被覆管の応力評価に関しては，燃料の健全性を確認する観点から，原子炉設置（変更）許可申請書添付書類八及び燃料体設計認可申請書添付書類Ⅱ（応力解析)において通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時に発生する内外圧力差による応力，熱応力などを考慮し，解析コードを用いて燃料被覆管の応力設計比の評価を行っている。また，工事計画認可申請書及び燃料体設計認可申請書添付書類Ⅱ（耐震解析）において，崩壊熱除去可能な形状の維持の観点から，地震時の一次応力も考慮した応力評価を実施している。

一方，平成 29 年８月 30 日の原子力規制委員会において「実用発電用原子炉及びその附属施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則」（以下,「設置許可基準規則」という）及び「実用発電用原子炉及びその附属施設の技術基準に関する規則」（以下,「技術基準規則」という）の改正が決定，平成 29 年９月 11 日に施行され,地震時の燃料被覆管の閉じ込め機能の維持についての要求が追加された。

本資料では,地震時の燃料被覆管の閉じ込め機能の維持に係る設計方針並びに基準地震動 Ss※1 及び弾性設計用地震動 Sd※2 による基準適合性の見通しについて説明する。なお，詳細評価については，適切な評価条件等を設定して実施することとし，その評価結果について工事計画認可申請段階で説明する。

※1：基準地震動Ssについては，「島根原子力発電所２号炉　地震による損傷の防止（資料番号　EP-050 改07　令和元年５月31日提出）」に示す地震動を用いた。

※2：弾性設計用地震動 Sd については,「島根原子力発電所２号炉　地震による損傷の防止（コメント回答）（資料１－１，令和元年６月 18 日提出)」に示す地震動を用いた。

2.　基本方針

2.1　要求事項の整理

設置許可基準規則第４条及び設置許可基準規則第４条の解釈の記載を第 2.1-1 表に，また，技術基準規則第５条及び技術基準規則第５条の解釈の記載を第 2.1-2 表に示す。

なお，本規則改正に伴う要求事項については,「実用発電用原子炉の燃料体に対する地震の影響の考慮について（平成 29 年２月 15 日，原子力規制庁)」において以下のとおり示されている。

『…地震時の燃料被覆管の閉じ込め機能の維持に係る評価として、より精緻化する観点から、地震力並びに地震力と重畳する可能性のある１次応力及び２次応力を加味した評価を実施することを求める必要がある。

よって、原子力規制庁としては、通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時に、基準地震動 Ss の地震が発生した場合でも、燃料被覆管の閉じ込め機能が維持できることを新たに要求し、耐震重要度分類 S クラスの耐震設計の考

え方にならって、その判断基準として、基準地震動 Ss の地震による 1 次応力を加味した運転状態における応力が設計引張強さを下回ること、また、弾性設計用地震動 Sd の地震による 1 次応力を加味した運転状態における応力が設計降伏点を下回ることとしたい。』

第 2.1-1 表　設置許可基準規則第４条及び設置許可基準規則第４条の解釈

設置許可基準規則 第４条（地震による損傷の防止）	設置許可基準規則の解釈 第４条（地震による損傷の防止）	備考
設計基準対象施設は、地震力に十分に耐えることができるものでなければならない。	一　第１項に規定する「地震力に十分に耐える」とは、通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時に生じるそれぞれの荷重と、弾性設計用地震動による地震力（本規程別記２第４条第４項第１号に規定する弾性設計用地震動による地震力をいう。）又は静的地震力（同項第２号に規定する静的地震力をいい、Ｓクラスに属する機器に対し算定されるものに限る。）のいずれか大きい方の地震力を組み合わせた荷重条件に対して、炉心内の燃料被覆材の応答が全体的におおむね弾性状態に留まることをいう。	解釈追記
２　前項の地震力は、地震の発生によって生ずるおそれがある設計基準対象施設の安全機能の喪失に起因する放射線による公衆への影響の程度に応じて算定しなければならない。	－	変更なし
３　耐震重要施設は、その供用中に当該耐震重要施設に大きな影響を及ぼすおそれがある地震による加速度によって作用する地震力（以下「基準地震動による地震力」という。）に対して安全機能が損なわれるおそれがないものでなければならない。	－	変更なし
４　耐震重要施設は、前項の地震の発生によって生ずるおそれがある斜面の崩壊に対して安全機能が損なわれるおそれがないものでなければならない。	－	変更なし

第 2.1-1 表　設置許可基準規則第４条及び設置許可基準規則第４条の解釈（続き）

設置許可基準規則 第４条（地震による損傷の防止）	設置許可基準規則の解釈 第４条（地震による損傷の防止）	備考
５　炉心内の燃料被覆材は、基準地震動による地震力に対して放射性物質の閉じ込めの機能が損なわれるおそれがないものでなければならない。	二　第５項に規定する「基準地震動による地震力に対して放射性物質の閉じ込めの機能が損なわれるおそれがない」とは、通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時に生じるそれぞれの荷重と基準地震動による地震力を組み合わせた荷重条件により塑性ひずみが生じる場合であっても、その量が小さなレベルに留まって破断延性限界に十分な余裕を有し、放射性物質の閉じ込めの機能に影響を及ぼさないことをいう。	追加要求事項

第 2.1-2 表　技術基準規則第５条及び技術基準規則第５条の解釈

技術基準規則 第５条（地震による損傷の防止）	技術基準規則の解釈 第５条（地震による損傷の防止）	備考
設計基準対象施設は、これに作用する地震力（設置許可基準規則第四条第二項の規定により算定する地震力をいう。）による損壊により公衆に放射線障害を及ぼさないように施設しなければならない。	－	変更なし
２　耐震重要施設（設置許可基準規則第三条第一項に規定する耐震重要施設をいう。以下同じ。）は、基準地震動による地震力（設置許可基準規則第四条第三項に規定する基準地震動による地震力をいう。以下同じ。）に対してその安全性が損なわれるおそれがないように施設しなければならない。	－	変更なし
３　耐震重要施設が設置許可基準規則第四条第三項の地震により生ずる斜面の崩壊によりその安全性が損なわれるおそれがないよう、防護措置その他の適切な措置を講じなければならない。	－	変更なし
４　炉心内の燃料被覆材は、基準地震動による地震力に対して放射性物質の閉じ込めの機能が損なわれるおそれがないように施設しなければならない。	５　第４項に規定する「基準地震動による地震力に対して放射性物質の閉じ込めの機能が損なわれるおそれがない」とは、通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時に生じるそれぞれの荷重と基準地震動による地震力を組み合わせた荷重条件により塑性ひずみが生じる場合であっても、その量が小さなレベルに留まって破断延性限界に十分な余裕を有し、放射性物質の閉じ込めの機能に影響を及ぼさないことをいう。	追加要求事項

2.2　追加要求事項への適合性に係る設計方針

燃料被覆管については，通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時に生じるそれぞれの荷重と，弾性設計用地震動による地震力又は静的地震力のいずれか大きい方の地震力を組み合わせた荷重条件に対して，炉心内の燃料被覆管の応答が全体的におおむね弾性状態にとどまる設計とする。

また，通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時に生じるそれぞれの荷重と基準地震動による地震力を組み合わせた荷重条件により塑性ひずみが生じる場合であっても，その量が小さなレベルにとどまって破断延性限界に対し十分な余裕を有し，放射性物質の閉じ込めの機能に影響を及ぼさない設計とする。（添付資料 11 参照）

3.　追加要求事項に係る評価項目の選定

BWR 燃料集合体は「沸騰水型原子炉に用いられる８行８列型の燃料集合体について（昭和 49 年 12 月 25 日，原子炉安全専門審査会)」に従い，構造強度設計で以下を考慮している。なお，損傷限界は１％塑性歪及び沸騰遷移であり，それぞれ最大線出力密度と最小限界出力比を通常運転時の熱的制限値として管理することで損傷限界に至らないことを確認しているため，地震の影響は問題とならない。

(1) 被覆管にかかる応力は，設計応力強さ限界を超えないこと。
(2) 累積疲労サイクル数は，設計疲労寿命を超えないこと。
(3) 使用中に燃料棒の変形等による過度の寸法変化を生じないこと。

上記のうち，(3)の燃料集合体に異常な寸法形状変化を生じさせないための以下の配慮は地震の影響が問題とならないことから評価対象としない。

・燃料被覆管製造時における残留応力除去
・スペーサによる燃料棒の間隔保持及び燃料棒の軸方向伸縮を拘束しない接触圧保持
・上部タイプレートを通して燃料棒の軸方向伸びを自由に逃げられるようにすること
・スペーサ等によるウォータロッドと燃料棒の軸方向伸びの差への処置

地震動により燃料被覆管に外力として応力が作用し，また，地震動が継続する間繰返し応力として作用するため，上記の内，(1)及び(2)について地震影響を考慮した評価を行う。

4.　地震時の燃料被覆管閉じ込め機能評価方針

第 4-1 図に燃料被覆管閉じ込め機能評価フロー，第 4-2 図に評価対象部位（スペーサ間，スペーサ部及び下部端栓溶接部）を示す。

燃料被覆管閉じ込め機能の評価は，燃料棒熱・機械設計解析コードから得られる燃料被覆管温度や燃料棒内圧のほか，炉心条件，地震動に対する燃料集合体の応答加速度等を入力値とした応力評価及び疲労評価により行う。燃料被覆管温度，

燃料棒内圧，炉心条件，燃料被覆管寸法等については不確かさを考慮した値を用いる。なお，基準地震動 Ss 等を用いた応力評価及び疲労評価の詳細手法については工事計画認可申請段階で説明する。

また，燃料集合体の浮き上がりの可能性については，冷却材による流体力，水平方向加速度（10G），鉛直方向加速度（２G）においても，浮き上がりの影響がない（燃料支持金具から外れない）ことが過去の解析評価により確認されている[1]。上記に加え，制御棒挿入時の突き上げや燃料と上部格子板との摩擦を考慮した場合においてもほぼ同様の結果となることが別の試験及び解析で確認されている[2]。（添付資料 12 参照）

5.　追加要求事項を踏まえた燃料被覆管応力評価条件

「実用発電用原子炉の燃料体に対する地震の影響の考慮について（平成 29 年２月 15 日，原子力規制庁）」を踏まえた燃料被覆管の応力評価条件を第 5-1 表に示す。また，あわせて参考として従来より実施している燃料被覆管の応力評価条件を示す。追加要求事項を踏まえた燃料被覆管の応力評価条件は，従来の燃料被覆管の応力評価条件に代わるものではなく，追加されるものである。

評価対象燃料は，原子炉設置変更許可済の９×９ 燃料（A 型），９×９ 燃料（B 型）及びウラン・プルトニウム混合酸化物燃料※1（以下，「MOX 燃料」という）とする。

※1：工事計画認可は未取得

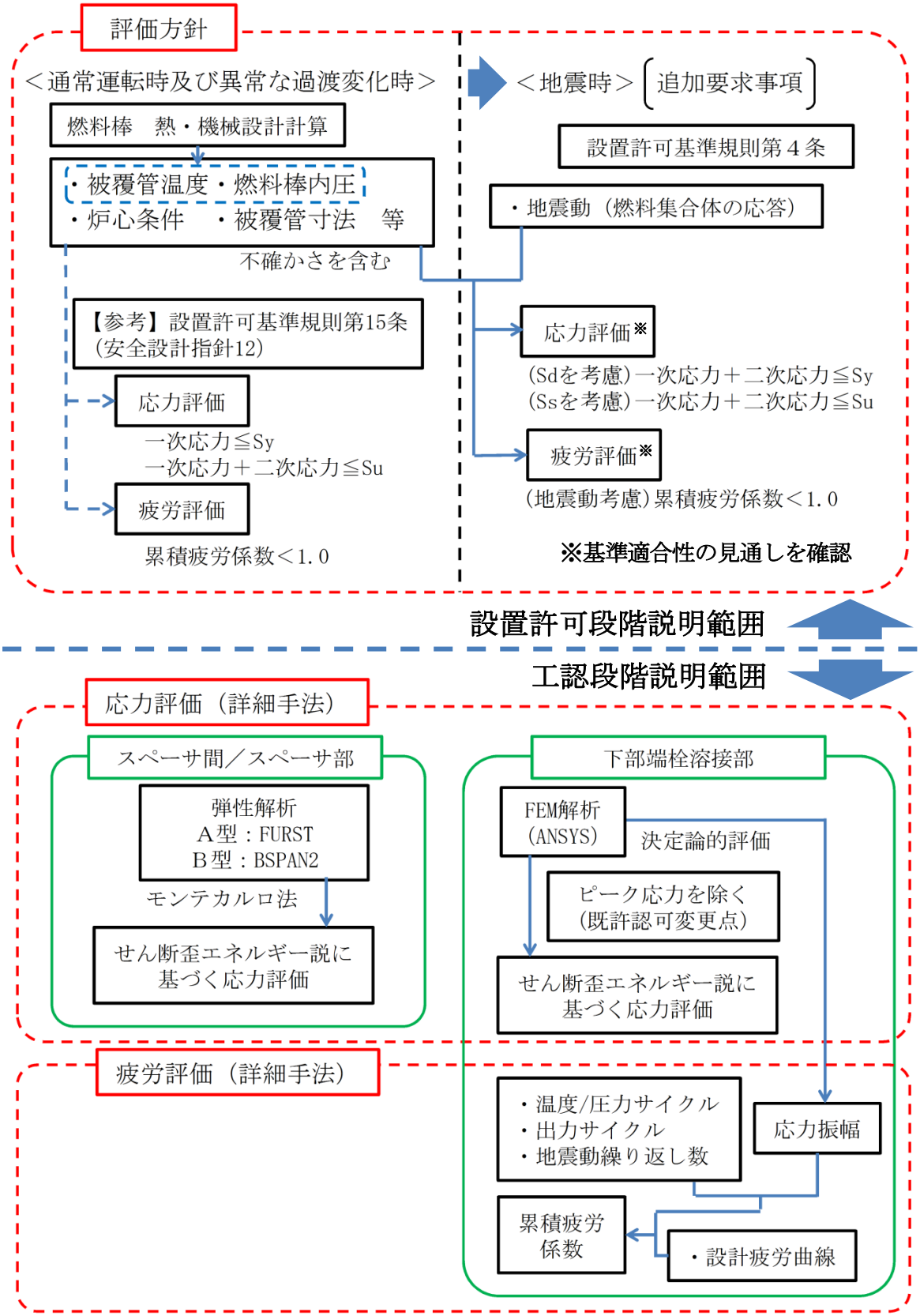
第 5-1 表　追加要求事項を踏まえた燃料被覆管の応力評価条件

運転状態	要求機能	考慮する応力と地震動※2	許容応力
地震時	地震時における燃料被覆管の閉じ込め機能	一次応力（Sd を考慮）+二次応力（Sd を考慮）	降伏応力（Sy）
		一次応力（Ss を考慮）+二次応力（Ss を考慮）	引張強さ（Su）

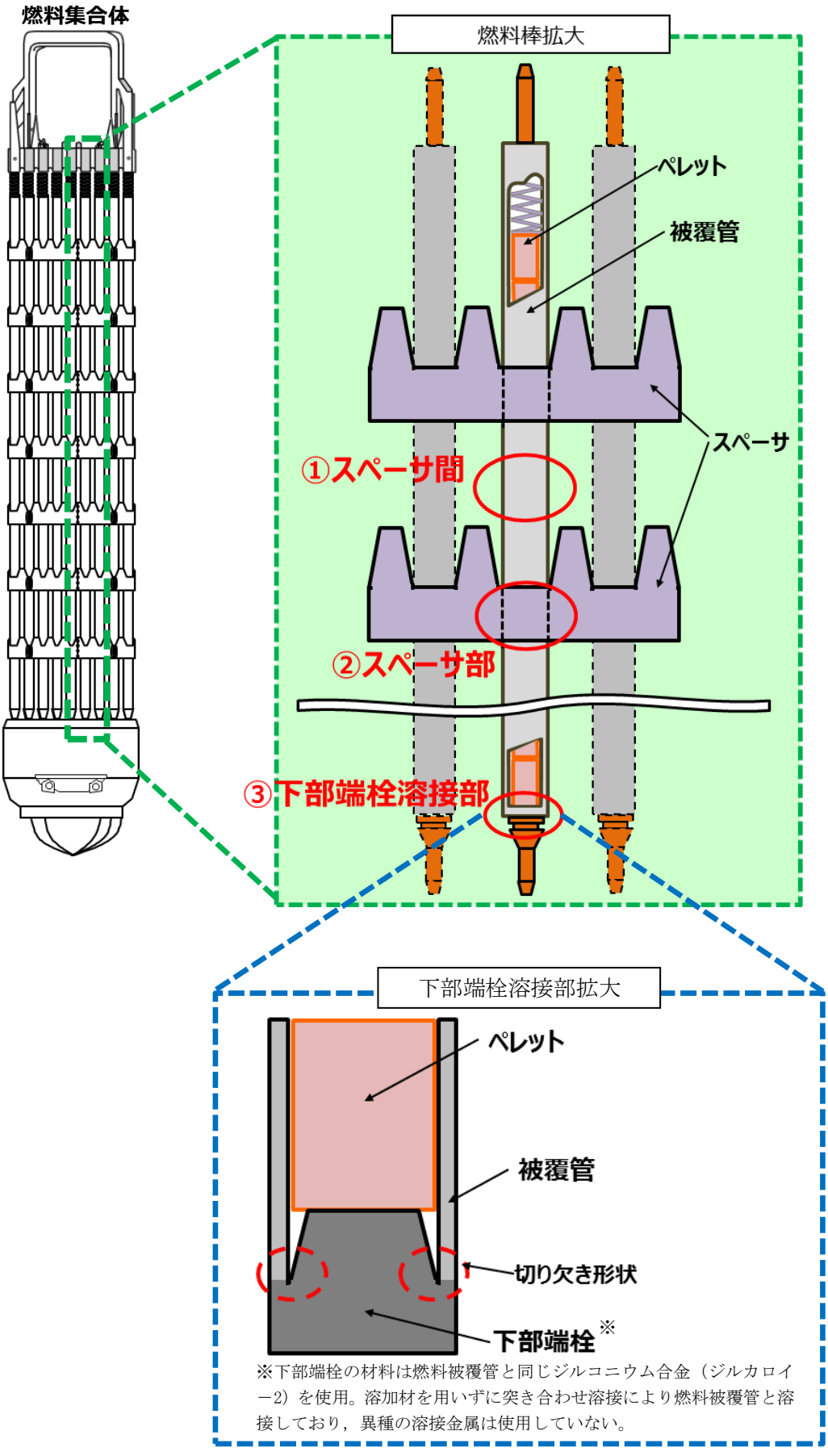
※2：評価に当たって考慮する地震動を（　）内に示す。

（参考）　従来の燃料被覆管の応力評価基準

運転状態	要求機能	考慮する応力と地震動	許容応力
通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時	燃料被覆管の閉じ込め機能	一次応力	降伏応力（Sy）
		一次応力+二次応力	引張強さ（Su）
地震時	崩壊熱除去可能な形状の維持	一次応力	0.7Su



第 4-1 図　燃料被覆管閉じ込め機能評価フロー



第 4-2 図　評価対象部位（イメージ）

6.　評価手法

6.1　応力評価手法[3]

燃料被覆管応力評価は，燃料被覆管のスペーサ間，スペーサ部及び下部端栓溶接部の各位置において，せん断歪エネルギー説（von Mises 理論）に基づき燃料被覆管の相当応力を求め応力設計比※3を評価することにより行う。応力計算は，燃料被覆管に発生するすべての応力を三軸方向（半径方向，円周方向及び軸方向）について解析し，それらより相当応力を評価する。燃料被覆管の応力評価に考慮する応力を添付資料１に示す。

スペーサ間及びスペーサ部における応力評価では，燃料被覆管に発生する各応力についての厚肉円筒式を用いた弾性解析により，厚肉円筒式の入力変数の統計的分布に基づくモンテカルロ法（添付資料６参照）による統計評価を行う。このため応力設計比は，燃料被覆管寸法，燃料被覆管温度，燃料棒内圧，炉心条件，許容応力等の統計的入力変数の関数となる。入力変数の統計的分布は，製造実績，実機運転データ等を考慮して設定した値を用いる。モンテカルロ法による評価では，１回の試行毎に乱数が用いられ，統計的分布に従い設定された入力条件から１つの応力設計比が得られる。この試行を繰り返すことにより応力設計比の 95%確率上限値を求める。応力設計比の 95%確率上限値が１以下であることで燃料の健全性を確認する。（添付資料 10 参照）

下部端栓溶接部における応力評価については，形状が複雑であることから有限要素法による決定論的評価を実施し，一次応力＋二次応力と許容応力を比較して応力設計比が１以下であることを確認している。なお，既許認可における下部端栓溶接部の応力評価では簡便な扱いとしてピーク応力を含んだ値を用いていたが，今回の申請ではピーク応力を含まない一次応力＋二次応力にて応力評価を行う（添付資料２参照）。入力変数については，保守的な条件（変数の 95%確率上下限値）を使用している。（添付資料 10 参照）

※3：応力設計比＝発生応力（通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時にかかる応力＋地震時にかかる応力）／許容応力

6.2　疲労評価手法

燃料の疲労限界に対する設計基準は，累積損傷の法則（Miner の仮説）及び Langer-0’Donnell の考え方に基づく。具体的には９×９ 燃料（A 型）及び９×９ 燃料（B 型）については炉内滞在期間８年を，MOX 燃料については炉内滞在期間７年を仮定した温度･圧力及び出力の予測サイクル※4による疲労に加え，地震動による繰り返し荷重※5を考慮し，累積疲労係数が 1.0 未満であることを確認する。疲労評価においては，一次応力と二次応力に加えてピーク応力を考慮する。また，地震荷重の繰り返し数については，原子炉建物－大型機器連成解析モデルを用いた地震応答解析に基づき算出された値を踏まえ，基準地震動 Ss は 150 回，弾性設計用地震動 Sd は 300 回として影響を確認する。なお，詳

細評価は工事計画認可申請段階にて行う。

※4 ： 予測サイクルを以下に示す。（原子炉設置（変更）許可申請書添付書類八より）

サイクル条件	予測サイクル
室温から100％出力	～４／年
高温待機状態から100％出力	～12／年
50％出力から100％出力	～60／年
75％出力から100％出力	～250／年
100％出力から121％出力	～0.5／年

※5 ： 地震時の荷重方向を反転させた解析結果より，主応力方向が変化する場合の応力の変化幅を計算し，その半分を応力振幅として繰り返し荷重を設定する。

7. 評価結果

燃料被覆管応力評価結果を添付資料３に示す。通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時に発生する応力に加えて地震による応力を考慮した場合においても，応力設計比は最大で 0.80（９×９ 燃料（A 型)），0.79（９×９ 燃料（B 型））及び 0.84（MOX 燃料）であり，1.0 より小さいことを確認した。

燃料被覆管疲労評価結果を添付資料４に示す。地震力が繰り返された場合の応力振幅と繰り返し回数，ジルカロイの設計疲労曲線を用いて評価された疲労係数の増分は，0.00250（９×９ 燃料（A 型)），0.00532（９×９ 燃料（B 型））及び 0.00508（MOX 燃料）となった。よって，予測サイクルに基づく累積疲労係数（約 0.003[4]（９×９ 燃料（A 型)），約 0.006[5]（９×９ 燃料（B 型））及び約 0.006※6（MOX 燃料)）に，地震動による疲労係数の増分を加えても累積疲労係数は 1.0 より小さいことを確認した。

※6 ：島根原子力発電所２号炉における MOX 燃料の採用に係る原子炉設置変更許可申請時の MOX 燃料被覆管疲労評価結果

8. まとめ

地震時の燃料被覆管の閉じ込め機能の維持に係る設計方針を示すとともに，基準地震動 Ss 及び弾性設計用地震動 Sd による評価により，基準に適合する見通しであることを確認した。なお，詳細評価については工事計画認可申請段階で説明する。

参考文献

[1] 平成 17 年度原子力施設等の耐震性評価技術に関する試験及び調査機器耐力その２（BWR 制御棒挿入性）に係る報告書（平成 18 年９月原子力安全基盤機構）

[2] 浜岡原子力発電所３，４号機「発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針」の改訂に伴う耐震安全性評価に関わる報告のうち耐震設計上重要な機器・配管系の耐震安全性評価（補足説明資料）（平成 19 年 10 月 23 日 中部電力株式会社）

[3] 発電用軽水型原子炉の燃料設計手法について（昭和 63 年５月 12 日 原子力安全委員会了承）

[4] 島根原子力発電所第２号機「燃料体設計認可申請書」（GNF 燃設認第 30 号，平成 21 年１月７日認可）

[5] 島根原子力発電所第２号機「燃料体設計認可申請書」（20 原燃東 第 805 号，平成 21 年２月 12 日認可）

添付資料１

燃料被覆管の応力評価に考慮する応力について

各評価対象部位において考慮する応力を添付 1-1 表に示す。評価対象部位（スペーサ間，スペーサ部及び下部端栓溶接部）を添付 1-1 図に示す。また，燃料集合体の構造図（９×９燃料(A 型)）を添付 1-2 図に，燃料集合体の構造図（９×９燃料(B 型)）を添付 1-3 図に，燃料集合体の構造図（MOX 燃料）を添付 1-4 図に示す。９×９燃料（A 型）は燃料棒の配列が９行９列であり，74 本の燃料棒と２本の太径のウォータロッドからなる。９×９燃料（B 型）は燃料棒の配列が９行９列であり，72 本の燃料棒と１本の角管のウォータチャンネルからなる。MOX 燃料は燃料棒の配列が８行８列であり，60 本の燃料棒と１本の太径のウォータロッドからなる。なお，９×９ 燃料（A 型）のみに標準燃料棒の約２／３の長さとなる部分長燃料棒が８本存在する。

添付 1-1 表　各評価対象部位において考慮する応力

考慮する応力	スペーサ間	スペーサ部	下部端栓溶接部
(1)内外圧力差に基づく応力	○	○	○
(2)水力振動に基づく応力	○	○※1	—
(3)楕円度に基づく応力	○	○	—
(4)スペーサ（支持格子）の接触力に基づく応力	—	○	—
(5)半径方向温度差に基づく応力	○	○	○
(6)円周方向温度差に基づく応力	○	○	○※1
(7)膨張スプリング等による軸方向荷重に基づく応力	○	○	○※1
(8)ウォータチャンネルと燃料被覆管の熱膨張差による応力	○※2	○※2	—
(9)端栓取付角公差による曲がりに基づく応力	—	—	○※1
(10)スペーサ（支持格子）間の水平地震力による燃料被覆管のたわみに基づく応力※3	○	○	○
(11)チャンネルボックスの水平地震力によるたわみに基づく応力※3	○	○	○
(12)鉛直方向地震加速度に基づく応力※3	○	○	○

※1：９×９燃料（A 型）及び MOX 燃料の場合にのみ考慮

※2：９×９燃料（B 型）の場合にのみ考慮

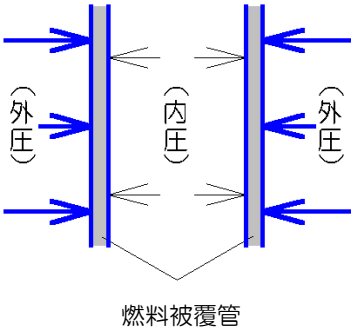
※3：地震動を考慮する場合に新たに加わる応力

［ 解　説 ］

1. 運転中（通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時）に発生する応力

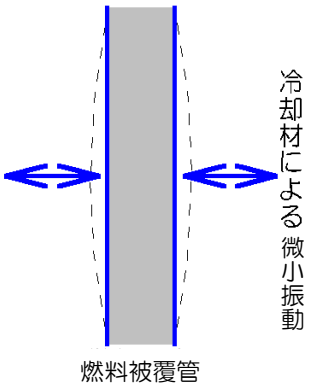
(1)内外圧力差に基づく応力

燃料被覆管内部ガス圧と冷却材圧力の差圧により発生する応力。



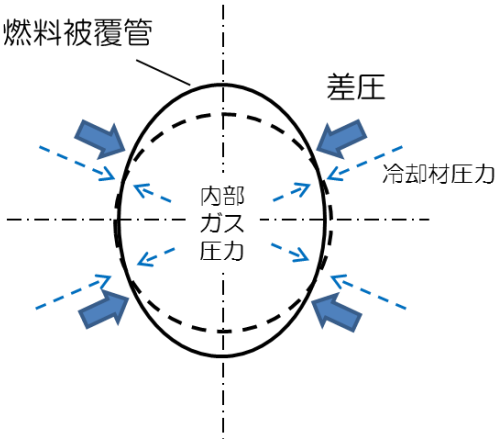
(2)水力振動に基づく応力

冷却材の流れによって生じる燃料被覆管の微小振動に基づき発生する応力。



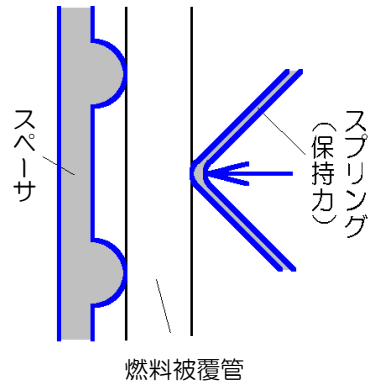
(3)楕円度に基づく応力

燃料被覆管製作時に生じる真円からのわずかな歪みにより，燃料被覆管内部ガス圧力と冷却材圧力の差圧により発生する応力。



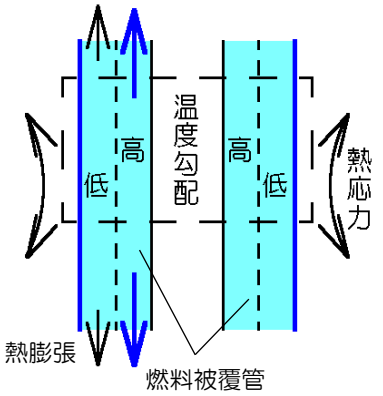
(4) スペーサ（支持格子）の接触力に基づく応力

スペーサ（支持格子）のばね押圧により，スペーサ部に発生する応力。



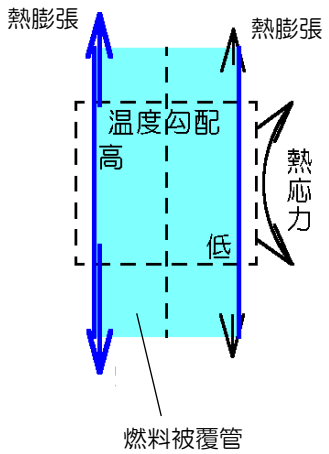
(5) 半径方向温度差に基づく応力

燃料被覆管内外面の温度差に基づく熱膨張差が拘束されることにより発生する応力。



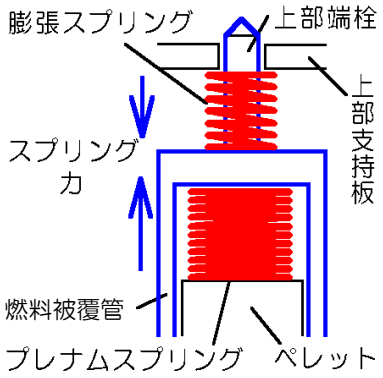
(6) 円周方向温度差に基づく応力

燃料被覆管の円周方向温度分布の不均一による燃料被覆管の湾曲がスペーサ（支持格子）により拘束されることで発生する応力。（９×９燃料（B 型）の熱湾曲矯正による応力も同様の応力）



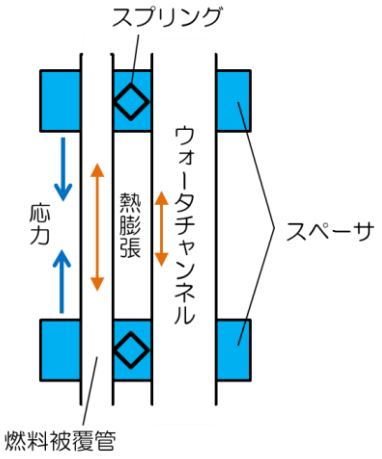
(7)膨張スプリング等による軸方向荷重に基づく応力

膨張スプリング及びプレナムスプリング(内部スプリング)により発生する応力。９×９燃料（A 型）及び MOX 燃料については，燃料自重による応力も含む。



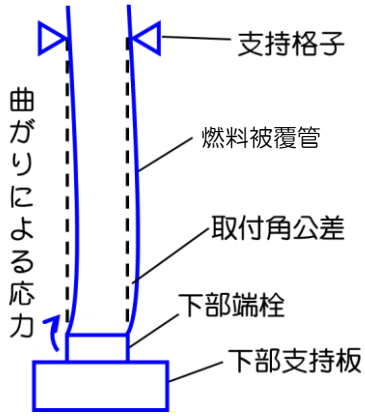
(8)ウォータチャンネルと燃料被覆管の熱膨張差による応力

燃料被覆管とウォータチャンネルの熱膨張差により，燃料被覆管の伸びが拘束されることにより発生する応力（９×９燃料（B 型）のみ)。



(9)端栓取付角公差による曲がりに基づく応力

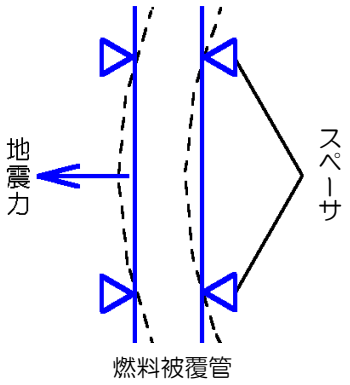
下部端栓の取付角の公差により，下部端栓とスペーサ(支持格子)との間で燃料被覆管に曲げが生じることにより発生する応力（９×９燃料（A 型）及び MOX 燃料のみ)。



2. 地震時に付加される応力

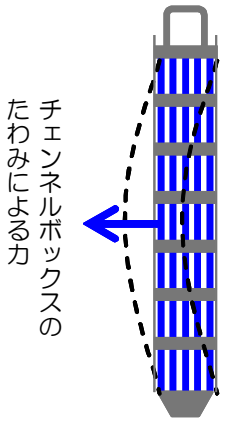
(10) スペーサ（支持格子）間の水平地震力による燃料被覆管のたわみに基づく応力

水平地震荷重により，スペーサ（支持格子）を支持点として燃料被覆管がたわむことにより発生する応力。



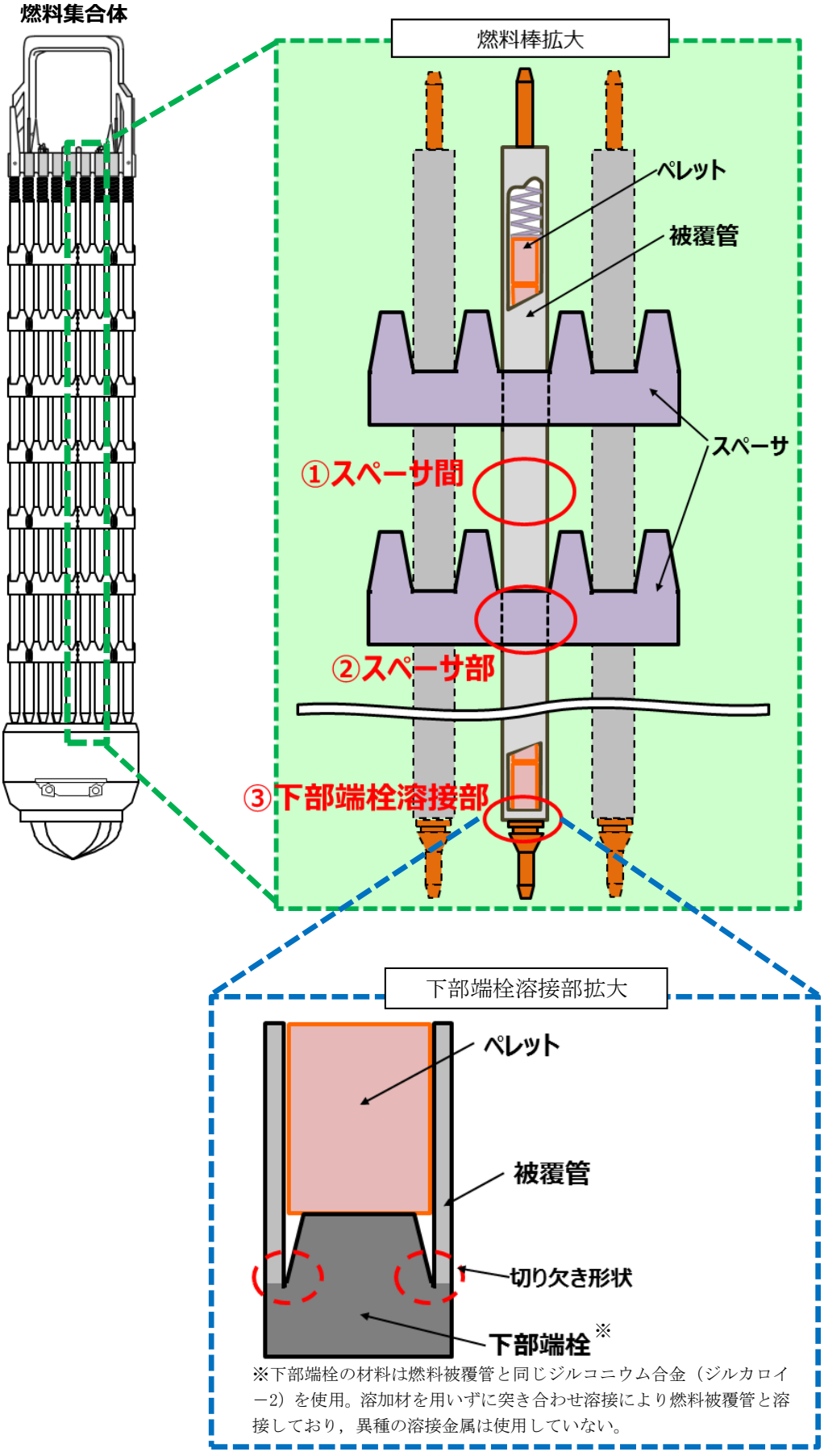
(11) チャンネルボックスの水平地震力によるたわみに基づく応力

水平地震荷重によるチャンネルボックスのたわみに従って，燃料被覆管がたわむことにより発生する応力。

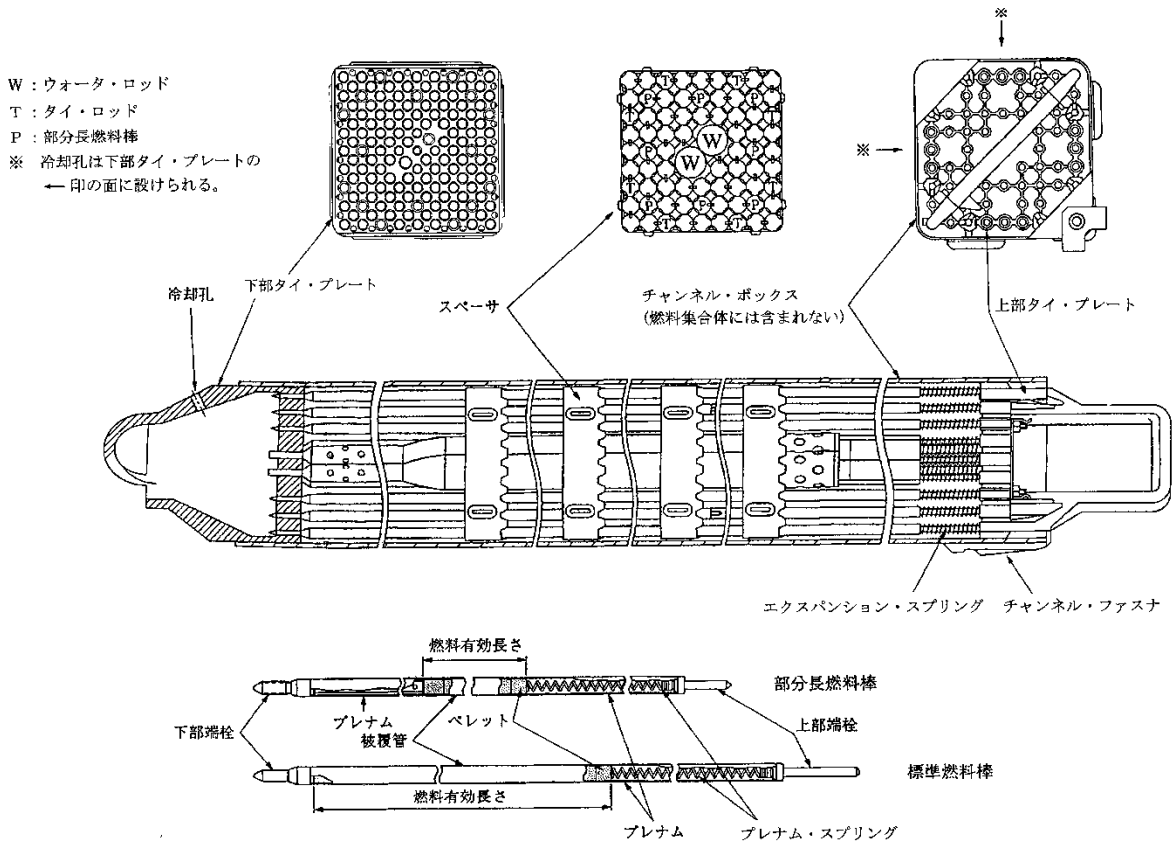


(12) 鉛直方向地震加速度に基づく応力

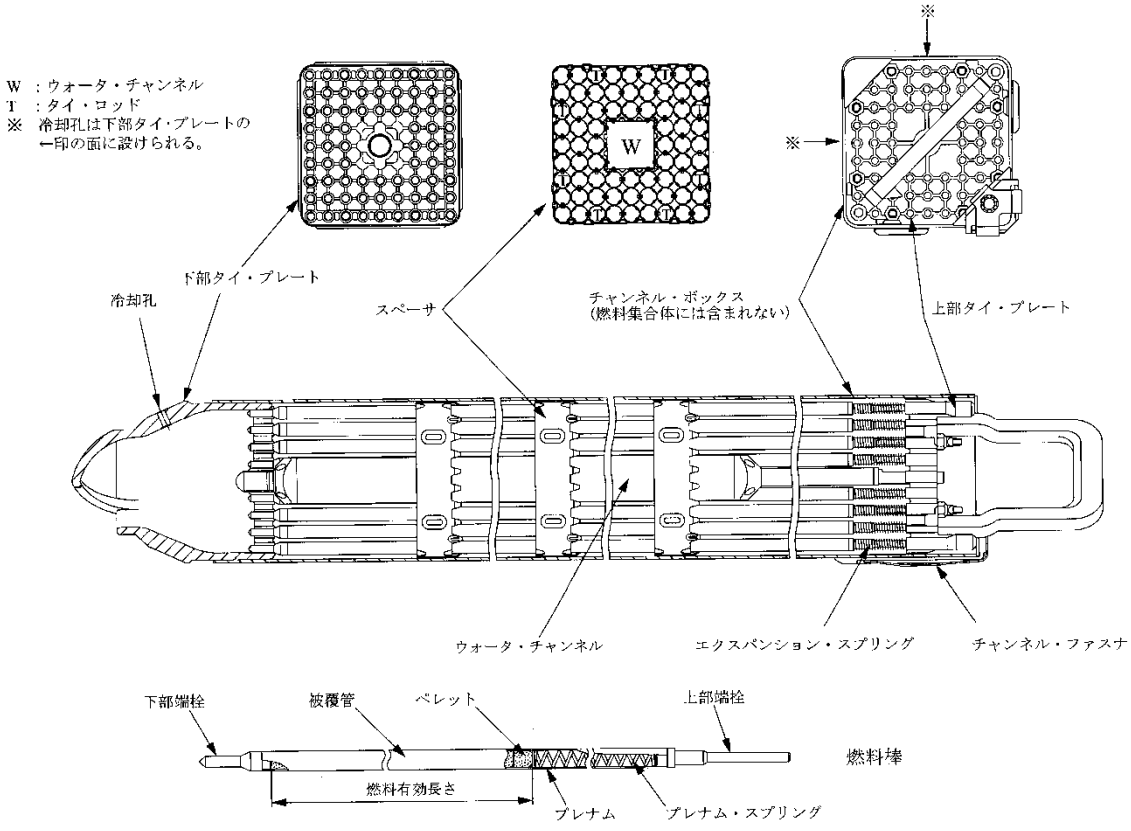
鉛直方向地震加速度により，燃料被覆管に見かけの質量が軸方向に付加されることにより発生する応力。なお，９×９燃料（B 型）では「(10) スペーサ（支持格子）間の水平地震力による燃料被覆管のたわみに基づく応力」に加味する形で考慮している。（添付資料８参照）



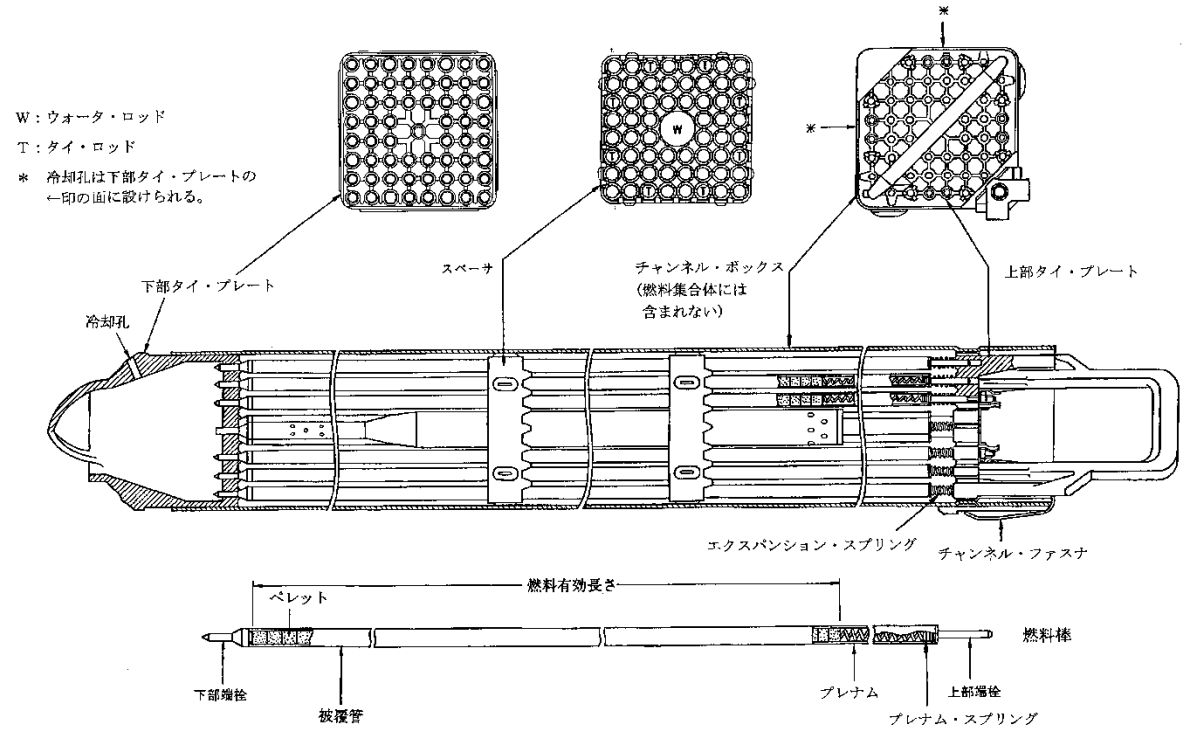
添付 1-1 図　評価対象部位（イメージ）【第 4-2 図再掲】



添付 1-2 図　燃料集合体の構造図(９×９燃料(A 型))



添付 1-3 図　燃料集合体の構造図(９×９燃料(B 型))



添付 1-4 図　燃料集合体の構造図(MOX 燃料)

添付資料２

燃料被覆管下部端栓溶接部における応力の取扱いについて

燃料被覆管下部端栓溶接部は，切り欠き形状を含む複雑な形状（添付 2-1 図参照）であるため有限要素法（以下，「FEM」という）を用いた解析により発生応力を求めており，得られる応力値には（一次応力＋二次応力＋ピーク応力）の全応力成分が含まれる（添付 2-2 図参照)。ピーク応力は，荷重の繰り返しがなければ直ちに破損につながることはなく[1]，JEAG 4601･補-1984[2]においてもピーク応力は疲労評価が対象とされている（添付 2-1 表参照)。よって，等価線形処理により FEM 解析結果から一次応力＋二次応力を求め，応力設計比の計算を行う。

等価線形処理は FEM 解析で得られた応力分布を膜応力，曲げ応力の等価直線成分及び曲げ応力の非直線成分に数値処理により分離する手法であり，圧力容器などのプラント機器の応力解析に適用されている。膜応力は肉厚方向に分布する応力の平均値に等しい応力成分，曲げ応力の等価直線成分は肉厚方向に分布する応力による正味の曲げモーメントと等しいモーメントによって生じる応力成分であり，これらが一次応力＋二次応力に相当する。これらと元の応力分布との差である曲げ応力の非直線成分がピーク応力に相当する。

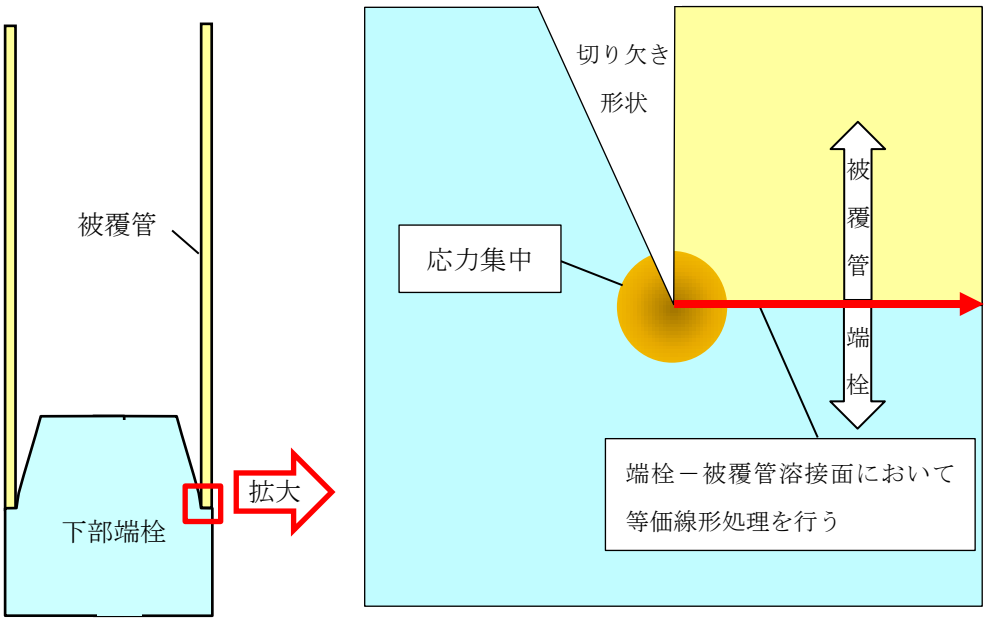
応力の考え方の模式図を添付 2-3 図に示す。応力が最も厳しい条件となるのはピーク応力の方向と正味の曲げモーメントの方向が一致するケースであり，下部端栓溶接部の応力解析では燃料被覆管内面位置が該当する。よって，応力設計比の評価には燃料被覆管内面位置での応力を用いる。

参考文献

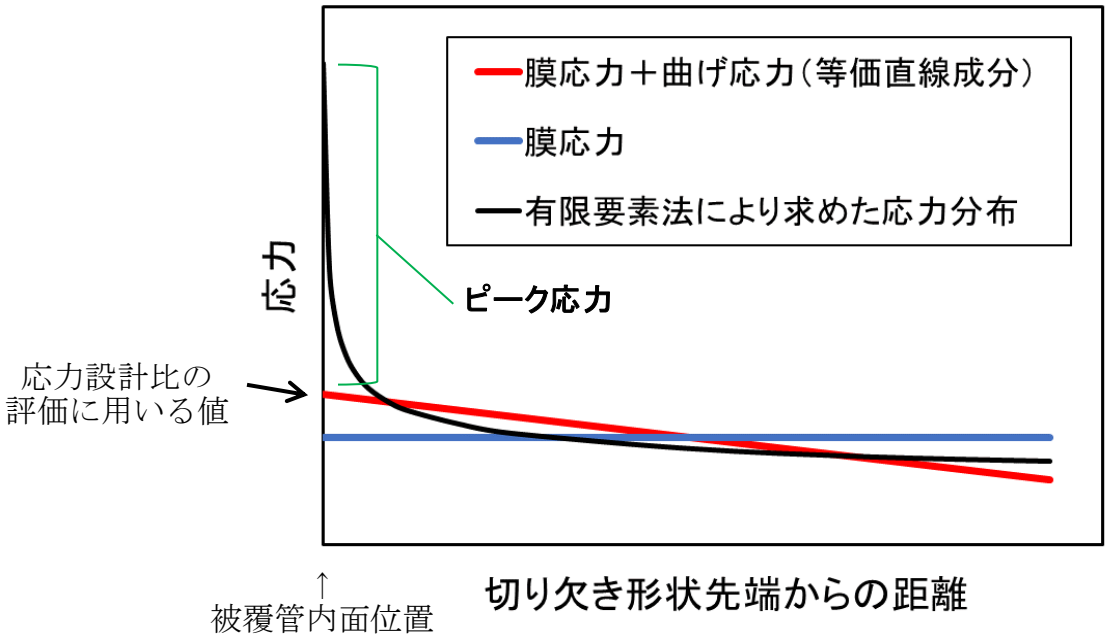
[1]「構造解析のための有限要素法実践ハンドブック」，森北出版，第１版第６刷，2012 年

[2] JEAG 4601･補-1984,「原子力発電所耐震設計技術指針　重要度分類･許容応力編」，（社）日本電気協会

[3] JSME S NC1-2005/2007「発電用原子力設備規格 設計・建設規格（2005 年版(2007 年追補版含む))」〈第１編 軽水炉規格〉，2007 年９月，日本機械学会



添付 2-1 図　下部端栓溶接部の有限要素法による応力解析体系（模式図）



添付 2-2 図　応力分布と等価線形処理結果の模式図

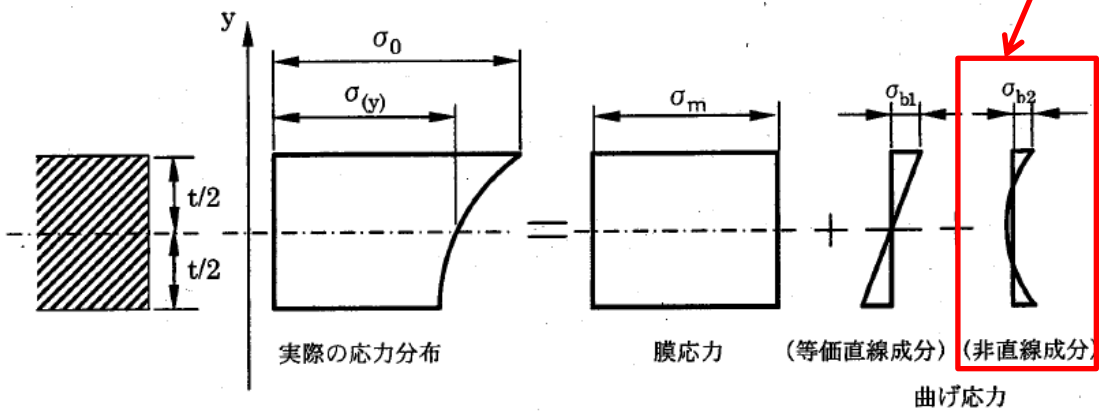
添付 2-1 表　第 1 種容器の許容応力（JEAG 4601・補-1984[2]からの抜粋）

2.1.1　第 1 種容器の許容応力

第 1 種容器の許容応力を次に示す。

応力分類 / 許容応力状態	1 次一般膜応力	1 次膜応力＋1 次曲げ応力	1 次＋ 2 次応力	1 次＋ 2 次＋ピーク応力	特別な応力限界	
					純せん断応力	支圧応力
設計条件	S_m	1.5 S_m	—	—	—	—
I_A	—	—	(1) 3 S_m	(2) 運転状態Ⅰ及びⅡにおける荷重の組合せについて疲れ解析を行い疲れ累積係数が 1.0 以下であること。	(7) 0.6 S_m	(8)(9) S_y (1.5 S_y)
II_A	—	—			(7) 0.6 S_m	(8)(9) S_y (1.5 S_y)
III_A	S_y と 2/3 S_u の小さい方。ただしオーステナイト系ステンレス鋼及び高ニッケル合金については 1.2 S_m とする。	左欄の1.5 倍の値	—	—	(7) 0.6 S_m	(8)(9) S_y (1.5 S_y)
IV_A	2/3 S_u。ただしオーステナイト系ステンレス鋼及び高ニッケル合金については 2/3 S_u と 2.4 S_m の小さい方。	左欄の1.5 倍の値	—	—	—	—
$III_A S$	S_y と 2/3 S_u の小さい方。ただしオーステナイト系ステンレス鋼及び高ニッケル合金については 1.2 S_m とする。	(3) 左欄の1.5 倍の値	(4) 3 S_m ［S_1 又は S_2 地震動のみによる応力振幅について評価する。］	(5)(6) S_1 又は S_2 地震動のみによる疲れ解析を行い疲れ累積係数を求め，運転状態Ⅰ，Ⅱにおける疲れ累積係数との和が 1.0 以下であること。	0.6 S_m	(9) S_y (1.5 S_y)
$IV_A S$	2/3 S_u。ただしオーステナイト系ステンレス鋼及び高ニッケル合金については 2/3 S_u と 2.4 S_m の小さい方。	左欄の1.5 倍の値			0.4 S_u	(9) S_u (1.5 S_u)

ピーク応力に相当



解説図　GNR-2130-1　膜応力と曲げ応力の考え方

解説図 GNR-2130-1 において、

膜応力 (σ_m)

$$\sigma_m = \frac{1}{t}\int_{-t/2}^{t/2}\sigma(y)dy \qquad \text{（解説 GNR-1.1）}$$

曲げ応力の等価直線成分 (σ_{b1})

$$\sigma_{b1} = \frac{6}{t^2}\int_{-t/2}^{t/2}y\sigma(y)dy \qquad \text{（解説 GNR-1.2）}$$

曲げ応力の非直線成分 (σ_{b2})

$$\sigma_{b2} = \sigma_0 - \sigma_m - \sigma_{b1} \qquad \text{（解説 GNR-1.3）}$$

添付 2-3 図　応力の考え方（JSME S NC1-2005/2007[3]からの抜粋）

地震による応力を考慮した燃料被覆管応力評価（閉じ込め機能の維持）について

通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時に発生する応力に加え地震による応力を考慮した場合の燃料被覆管応力評価結果を以下に示す。

［９×９ 燃料（A 型），MOX 燃料の評価結果］

(1)評価部位：スペーサ間，スペーサ部，下部端栓溶接部

(2)解析コード：＜スペーサ間，スペーサ部＞

弾性解析コード FURST Ver.5※1（設置許可，設計認可と同じ）

＜下部端栓溶接部＞

有限要素法解析コードANSYS Ver.14※2（添付資料７参照）

(3)評価点：燃料寿命初期，中期，末期

(4)運転状態：出力過渡（121％出力）または圧力過渡（冷却材圧力 [redacted] MPa[abs]）

(5)考慮する応力：①内外圧力差に基づく応力（一次応力）

②水力振動に基づく応力（一次応力）

③楕円度に基づく応力（一次応力）

④スペーサの接触圧に基づく応力（スペーサ部評価のみ）（二次応力）

⑤半径方向温度差に基づく熱応力（二次応力）

⑥円周方向温度差に基づく熱応力（二次応力）

⑦膨張スプリング等による軸方向荷重に基づく応力（一次応力）

⑧端栓取付角公差による曲がりに基づく応力（二次応力）

地震動による影響を評価する場合は下記応力を追加する。ここで燃料集合体の加速度（水平方向）は燃料集合体軸方向で分布を持つが，スペーサ間及びスペーサ部については最大値を固定値として入力する。

⑨スペーサ間の水平地震力による燃料被覆管のたわみに基づく応力（一次応力）

⑩チャンネルボックスの水平地震力によるたわみに基づく応力（二次応力）

⑪鉛直地震加速度に基づく応力（一次応力）

(6)許容応力：弾性設計用地震動（Sd）において，一次+二次応力に対して降伏応力（Sy）

基準地震動（Ss）において，一次+二次応力に対して引張強さ（Su）

（添付資料５参照）

(7) 地震動に係る入力値：＜スペーサ間，スペーサ部＞

水平加速度 4.10G（Ss 応答加速度）

鉛直加速度 1.54G※3（同上）

本資料のうち，枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

燃料集合体相対変位 35.0mm（Ss 応答変位）
水平加速度 3.97G（Sd 応答加速度）
鉛直加速度 0.78G（同上）
燃料集合体相対変位 33.9mm（Sd 応答変位）
＜下部端栓溶接部＞
水平加速度 2.21G（Ss 応答加速度）
鉛直加速度 1.54G※3（同上）
燃料集合体相対変位 35.0mm（Ss 応答変位）
水平加速度 2.20G（Sd 応答加速度）
鉛直加速度 0.78G（同上）
燃料集合体相対変位 33.9mm（Sd 応答変位）

ここで，燃料集合体に作用する水平地震加速度及び鉛直地震加速度，燃料集合体の相対変位として，基本ケースの値に加えて地盤の不確かさを考慮した値を用いる。工事計画認可申請段階における評価では，その他の材料物性の不確かさ等も考慮する。

また，工事計画認可申請段階の評価においては，水平２方向及び鉛直方向を考慮した評価を実施する。燃料被覆管の水平２方向の地震動を考慮した評価では，別紙 10「水平２方向及び鉛直方向地震力の適切な組合せに関する検討について」参考資料３に示すとおり，島根原子力発電所の基準地震動 Ss のうち水平方向の地震動に方向性がないものについては，水平２方向及び鉛直方向地震動の同時入力による影響検討を行う場合，水平２方向のうち１方向について位相の異なる模擬地震波を作成し入力することを基本とする。別紙 10 に示すとおり，位相の異なる水平地震動を用いた場合，水平２方向の地震動によるオービットには偏りがない傾向となることから，水平２方向を考慮した場合の影響は軽微であると考えられるが，今後，工事計画認可申請段階で水平２方向の影響について詳細検討を実施する。

(8)評価結果：９×９ 燃料（A 型）の燃料被覆管応力評価結果を添付 3-1 表に，MOX 燃料の評価結果を添付 3-2 表に示す。９×９ 燃料（A 型）の応力設計比は最大で 0.80，MOX 燃料の応力設計比は最大で 0.84 であり，1.0 より小さいことを確認した。（添付資料 13 参照）

※1：地震時に燃料被覆管に発生する応力は，燃料被覆管に梁モデルを用いて，水平方向の加速度による燃料被覆管のたわみに基づく応力の計算式，チャンネルボックスのたわみにより強制変位を受けた際の応力計算式及び燃料被覆管に鉛直方向地震力が加わった場合に燃料被覆管断面にかかる圧縮及び引張応力の計算式で計算する。これは，通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時に発生する

応力の計算式を材料力学に基づいて設定している点と同様であり，応力計算方法は同じである。FURST はこれらの発生する応力を積算し，応力設計比が最大となるように組み合わせて計算することが可能である。

※2： 燃料被覆管下部端栓溶接部の切り欠き形状の先端近傍では応力集中が生じるがピーク応力は荷重の繰り返しがなければ直ちに破損につながることはないため，一次応力＋二次応力を評価に用いる。また，水平地震加速度及び燃料集合体の相対変位により生じる曲げ応力と鉛直地震加速度により発生する軸方向の引張応力及び圧縮応力の組合せにあたっては，引張方向及び圧縮方向の応力がそれぞれ絶対値が個々に大きくなるように組み合わせた解析を実施する。

※3： 鉛直加速度が１G を超過するため，燃料集合体が浮き上がる可能性について検討した結果を添付資料 12 に示す。既往知見より，鉛直加速度 1.5G の場合でも燃料集合体の浮き上がりは数㎜程度と小さく，浮き上がりに伴う衝突荷重の影響や冷却材流路に及ぼす影響は小さいものと考えているが，工事計画認可申請で島根２号炉の地震応答に対する燃料集合体の浮き上がりの影響について詳細検討を行う。

添付 3-1 表　燃料被覆管応力の評価結果（９×９ 燃料（A 型））

地震動と許容応力	運転条件	評価点	スペーサ間（応力設計比）	スペーサ部（応力設計比）	下部端栓溶接部（応力設計比）
弾性設計用地震動 Sd に対して降伏応力 Sy	圧力過渡	寿命初期	0.80	0.77	0.72
		寿命中期	0.30	0.27	0.34
		寿命末期	0.26	0.25	0.26
	出力過渡	寿命初期	0.77	0.67	0.66
		寿命中期	0.32	0.30	0.31
		寿命末期	0.27	0.25	0.24
基準地震動 Ss に対して引張強さ Su	圧力過渡	寿命初期	0.46	0.42	0.40
		寿命中期	0.28	0.26	0.31
		寿命末期	0.24	0.24	0.26
	出力過渡	寿命初期	0.45	0.37	0.37
		寿命中期	0.29	0.27	0.29
		寿命末期	0.25	0.23	0.23

添付 3-2 表　燃料被覆管応力の評価結果（MOX 燃料）

地震動と許容応力	運転条件	評価点	スペーサ間（応力設計比）	スペーサ部（応力設計比）	下部端栓溶接部（応力設計比）
弾性設計用地震動 Sd に対して降伏応力 Sy	圧力過渡	寿命初期	0.84	0.66	0.81
		寿命中期	0.34	0.33	0.38
		寿命末期	0.44	0.45	0.32
	出力過渡	寿命初期	0.82	0.64	0.78
		寿命中期	0.44	0.44	0.37
		寿命末期	0.63	0.64	0.31
基準地震動 Ss に対して引張強さ Su	圧力過渡	寿命初期	0.49	0.38	0.45
		寿命中期	0.31	0.30	0.35
		寿命末期	0.37	0.37	0.31
	出力過渡	寿命初期	0.49	0.38	0.44
		寿命中期	0.38	0.37	0.34
		寿命末期	0.50	0.49	0.30

[燃料タイプ：９×９ 燃料（B 型）の評価結果]

(1)評価部位：スペーサ間，スペーサ部，下部端栓溶接部

(2)解析コード：＜スペーサ間，スペーサ部＞

弾性解析コードBSPAN2 Ver.2.2※1（設置許可，設計認可と同じ）

＜下部端栓溶接部＞

有限要素法解析コードANSYS Ver.13※2

(3)評価点：燃料寿命初期，中期，末期

(4)運転状態：出力過渡（121%出力）または圧力過渡（冷却材圧力 [redacted] MPa[abs]）

(5)考慮する応力：①冷却材による外圧及び燃料棒内圧によって生じる応力（一次応力）

②流力振動による応力（スペーサ間評価のみ）（一次応力）

③燃料被覆管楕円度による曲げ応力（一次応力）

④支持格子での保持力による応力（スペーサ部評価のみ）（二次応力）

⑤燃料被覆管の径方向温度勾配による応力（二次応力）

⑥燃料被覆管の周方向温度勾配による応力（二次応力）

⑦熱湾曲矯正による応力（二次応力）

⑧膨張スプリング及び内部スプリングによる応力（二次応力）

⑨ウォータチャンネルと燃料被覆管の熱膨張差による応力（二次応力）

地震による影響を評価する場合は下記応力を追加する。ここで燃料集合体の加速度（水平方向）は燃料集合体軸方向で分布を持つが，スペーサ間及びスペーサ部については最大値を固定値として入力する。

⑩支持格子間の水平地震力によるたわみに基づく応力（一次応力）

⑪チャンネルボックスの水平地震力によるたわみに基づく応力（二次応力）

なお，鉛直方向の地震加速度は燃料要素単位長質量に加速度を考慮することでみかけの質量増加として扱い，⑩に加味することで計算する。水平方向の地震加速度がおよそ [redacted] を超える範囲において，地震時鉛直加速度を直接軸方向応力として作用させる手法に対して本手法が保守的な評価となることを確認している。（添付資料８参照）

(6)許容応力：弾性設計用地震動（Sd）において一次+二次応力に対して降伏応力（Sy）

基準地震動（Ss）において，一次+二次応力に対して引張強さ（Su）

（添付資料５参照）

(7) 地震動に係る入力値：＜スペーサ間，スペーサ部＞

水平加速度 4.10G（Ss 応答加速度）

鉛直加速度 1.54G※3（同上）

燃料集合体相対変位 35.0mm（Ss 応答変位）

水平加速度 3.97G（Sd 応答加速度）

鉛直加速度 0.78G（同上）

本資料のうち，枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

燃料集合体相対変位 33.9㎜（Sd 応答変位）

＜下部端栓溶接部＞

水平加速度 2.21G（Ss 応答加速度）

鉛直加速度 1.54G※3（同上）

燃料集合体相対変位 35.0㎜（Ss 応答変位）

水平加速度 2.20G（Sd 応答加速度）

鉛直加速度 0.78G（同上）

燃料集合体相対変位 33.9㎜（Sd 応答変位）

ここで，燃料集合体に作用する水平地震加速度及び鉛直地震加速度，燃料集合体の相対変位として，基本ケースの値に加えて地盤の不確かさを考慮した値を用いる。工事計画認可申請段階における評価では，その他の材料物性の不確かさ等も考慮する。

また，工事計画認可申請段階の評価においては，水平２方向及び鉛直方向を考慮した評価を実施する。燃料被覆管の水平２方向の地震動を考慮した評価では，別紙 10「水平２方向及び鉛直方向地震力の適切な組合せに関する検討について」参考資料３に示すとおり，島根原子力発電所の基準地震動 Ss のうち水平方向の地震動に方向性がないものについては，水平２方向及び鉛直方向地震動の同時入力による影響検討を行う場合，水平２方向のうち１方向について位相の異なる模擬地震波を作成し入力することを基本とする。別紙 10 に示すとおり，位相の異なる水平地震動を用いた場合，水平２方向の地震動によるオービットには偏りがない傾向となることから，水平２方向を考慮した場合の影響は軽微であると考えられるが，今後，工事計画認可申請段階で水平２方向の影響について詳細検討を実施する。

(8)評価結果：９×９ 燃料(B 型)の燃料被覆管応力評価結果を添付 3-3 表に示す。９×９ 燃料（B 型）の応力設計比は最大で 0.79 であり，1.0 より小さいことを確認した。

※1：地震時に燃料被覆管に発生する応力は，燃料被覆管に梁モデルを用いて，水平方向の加速度による燃料被覆管のたわみに基づく応力の計算式，チャンネルボックスのたわみにより強制変位を受けた際の応力計算式及び燃料被覆管に鉛直方向地震力が加わった場合に燃料被覆管断面にかかる圧縮及び引張応力の計算式で計算する。これは，通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時に発生する応力の計算式を材料力学に基づいて設定している点と同様であり，応力計算方法は同じである。BSPAN2 はこれらの発生する応力を積算し，応力設計比が最大となるように組み合わせて計算することが可能である。

※2： 燃料被覆管下部端栓溶接部の切り欠き形状の先端近傍では応力集中が生じるがピーク応力は荷重の繰り返しがなければ直ちに破損につながることはないため，一次応力＋二次応力を評価に用いる。また，水平地震加速度及び燃料集合体の相対変位により生じる曲げ応力と鉛直地震加速度により発生する軸方向の引張応力及び圧縮応力の組合せにあたっては，引張方向及び圧縮方向の応力がそれぞれ絶対値が個々に大きくなるように組み合わせた解析を実施する。

※3： 鉛直加速度が１G を超過するため，燃料集合体が浮き上がる可能性について検討した結果を添付資料 12 に示す。既往知見より，鉛直加速度 1.5G の場合でも燃料集合体の浮き上がりは数㎜程度と小さく，浮き上がりに伴う衝突荷重の影響や冷却材流路に及ぼす影響は小さいものと考えているが，工事計画認可申請で島根２号炉の地震応答に対する燃料集合体の浮き上がりの影響について詳細検討を行う。

添付 3-3 表　燃料被覆管応力の評価結果（９×９ 燃料（B 型））

地震動と許容応力	運転条件	評価点	スペーサ間（応力設計比）	スペーサ部（応力設計比）	下部端栓溶接部（応力設計比）
弾性設計用地震動 Sd に対して降伏応力 Sy	圧力過渡	寿命初期	0.76	0.79	0.69
		寿命中期	0.36	0.33	0.56
		寿命末期	0.31	0.29	0.52
	出力過渡	寿命初期	0.74	0.74	0.62
		寿命中期	0.39	0.35	0.51
		寿命末期	0.30	0.27	0.47
基準地震動 Ss に対して引張強さ Su	圧力過渡	寿命初期	0.48	0.48	0.40
		寿命中期	0.34	0.31	0.37
		寿命末期	0.30	0.28	0.35
	出力過渡	寿命初期	0.48	0.46	0.36
		寿命中期	0.36	0.33	0.35
		寿命末期	0.29	0.27	0.32

添付資料４

地震による繰り返し荷重を考慮した燃料被覆管疲労評価（閉じ込め機能の維持）について

地震による振動サイクルを考慮した場合の燃料被覆管疲労評価結果を以下に示す。燃料被覆管疲労解析の評価部位は，切り欠きと類似した形状を有し応力集中が発生する下部端栓溶接部とする。

［燃料タイプ：９×９ 燃料（A 型），MOX 燃料の評価結果］

(1)評価部位：下部端栓溶接部

(2)解析コード：有限要素法解析コード ANSYS Ver.14

(3)評価点：燃料寿命初期，中期，末期

(4)運転状態：評価上最も厳しい条件として圧力過渡（冷却材圧力[　　]MPa[abs]）

(5)地震荷重の繰り返し数：基準地震動 Ss 150 回
弾性設計用地震動 Sd 300 回

(6)許容サイクル数：ジルカロイ設計疲労曲線（添付 4-1 図参照）に基づき設定

(7)地震動に係る入力値：水平加速度 2.21G（Ss 応答加速度）
鉛直加速度 1.54G（同上）
燃料集合体相対変位 35.0mm（Ss 応答変位）
水平加速度 2.20G（Sd 応答加速度）
鉛直加速度 0.78G（同上）
燃料集合体相対変位 33.9mm（Sd 応答変位）

(8)評価結果：９×９ 燃料（A 型）及び MOX 燃料の地震による振動サイクルに伴う累積疲労係数の増分評価結果を添付 4-1 表及び添付 4-2 表に示す。９×９ 燃料（A 型）の累積疲労係数の増分は最大で 0.00250，MOX 燃料の累積疲労係数の増分は最大で 0.00508 となった。

本資料のうち，枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

添付 4-1 表　地震による振動サイクルに伴う累積疲労係数（９×９ 燃料（A 型））

地震動	評価点	応力振幅 (N/mm^2)	許容サイクル数	地震荷重の繰り返し数	疲労係数の増分
基準地震動 Ss	寿命初期	71	6.4×10^4	150	0.00234
	寿命中期	70	7.0×10^4	150	0.00214
	寿命末期	71	6.4×10^4	150	0.00234
弾性設計用地震動 Sd	寿命初期	66	1.2×10^5	300	0.00250
	寿命中期	66	1.2×10^5	300	0.00250
	寿命末期	66	1.2×10^5	300	0.00250

添付 4-2 表　地震による振動サイクルに伴う累積疲労係数（MOX 燃料）

地震動	評価点	応力振幅 (N/mm^2)	許容サイクル数	地震荷重の繰り返し数	疲労係数の増分
基準地震動 Ss	寿命初期	76	4.2×10^4	150	0.00357
	寿命中期	76	4.2×10^4	150	0.00357
	寿命末期	76	4.2×10^4	150	0.00357
弾性設計用地震動 Sd	寿命初期	72	5.9×10^4	300	0.00508
	寿命中期	71	6.4×10^4	300	0.00469
	寿命末期	71	6.4×10^4	300	0.00469

[燃料タイプ：９×９ 燃料（B 型）の評価結果]

(1)評価部位：下部端栓溶接部

(2)解析コード：有限要素法解析コードANSYS Ver.13

(3)評価点：燃料寿命初期，中期，末期

(4)運転状態：評価上最も厳しい条件として圧力過渡（冷却材圧力 [redacted] MPa[abs]）

(5)地震荷重の繰り返し数：基準地震動Ss 150回
弾性設計用地震動Sd 300回

(6)許容サイクル数：ジルカロイ設計疲労曲線（添付4-1図参照）に基づき設定

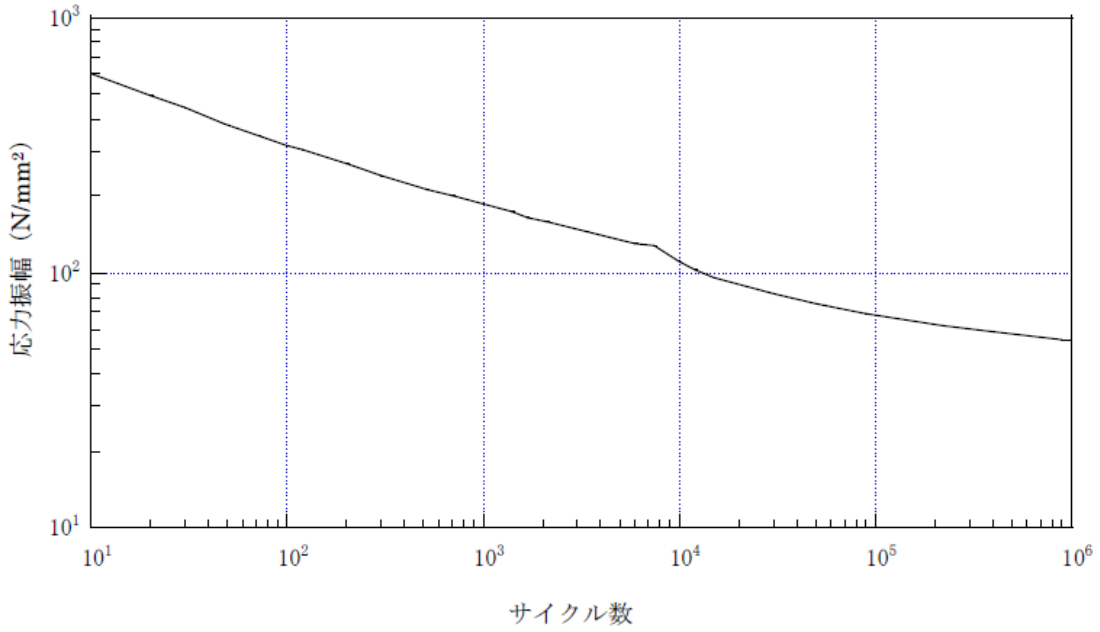
(7)地震動の入力値：水平加速度2.21G（Ss 応答加速度）
鉛直加速度1.54G（同上）
燃料集合体相対変位35.0mm（Ss 応答変位）
水平加速度2.20G（Sd 応答加速度）
鉛直加速度0.78G（同上）
燃料集合体相対変位33.9mm（Sd 応答変位）

(8)評価結果： ９×９ 燃料（B 型）の地震による振動サイクルに伴う累積疲労係数の増分評価結果を添付 4-3 表に示す。９×９ 燃料（B 型）の累積疲労係数の増分は最大で 0.00532 となった。

本資料のうち，枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

添付 4-3 表　地震による振動サイクルに伴う累積疲労係数（９×９ 燃料（B 型））

地震動	評価点	応力振幅 (N/mm^2)	許容サイクル数	地震荷重の繰り返し数	疲労係数の増分
基準地震動 Ss	寿命初期	87	2.8×10^4	150	0.00532
	寿命中期	85	3.0×10^4	150	0.00496
	寿命末期	84	3.2×10^4	150	0.00476
弾性設計用地震動 Sd	寿命初期	73	6.6×10^6	300	0.00458
	寿命中期	71	7.2×10^6	300	0.00416
	寿命末期	71	7.6×10^6	300	0.00393



添付4-1図　ジルカロイの設計疲労曲線※1

※1：ジルカロイ設計疲労曲線は，ジルカロイ－２の未照射材及び照射材についての疲労試験結果をベースに，ジルカロイ－４等の機械特性及び疲労特性がジルカロイ－２とほぼ同等であることを確認し，ジルカロイ－２，３及び４共通の設計曲線として設定したものである。Langer-0’Donnell は，設計曲線を保守側に見積もるため，未照射材及び照射材それぞれについて応力を1／2，サイクル数を1／20とし，未照射材及び照射材の両者の包絡線をLanger-0’Donnell の設計疲労曲線[1]としている。ここで，異なる高速中性子照射量に対する疲労試験結果から，疲労特性の照射量依存性は小さいことが示されており，また，過去の研究[2]において，高速中性子照射量約$1.3\times10^{22}cm^{-2}$までのジルカロイ－２燃料被覆管の疲労試験データが採取され，Langer-0’Donnellの照射材疲労試験データに包絡されることが確認されている。なお，BWRの燃料被覆管はジルカロイ－２を用い

ており，疲労評価の対象部位である下部端栓溶接部の寿命末期に相当する高速中性子照射量は，上記疲労試験[1,2]の範囲内にある。

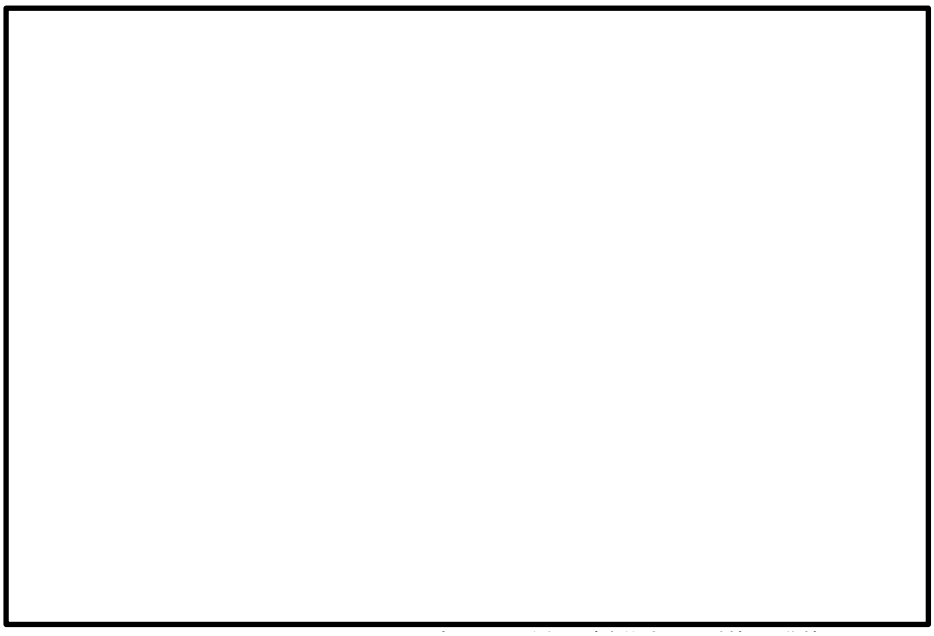
参考文献

[1] W. J. O'Donnell and B. F. Langer, ″Fatigue Design Basis for Zircaloy Components″,Nuclear Science and Engineering, 20, 1-12 (1964)

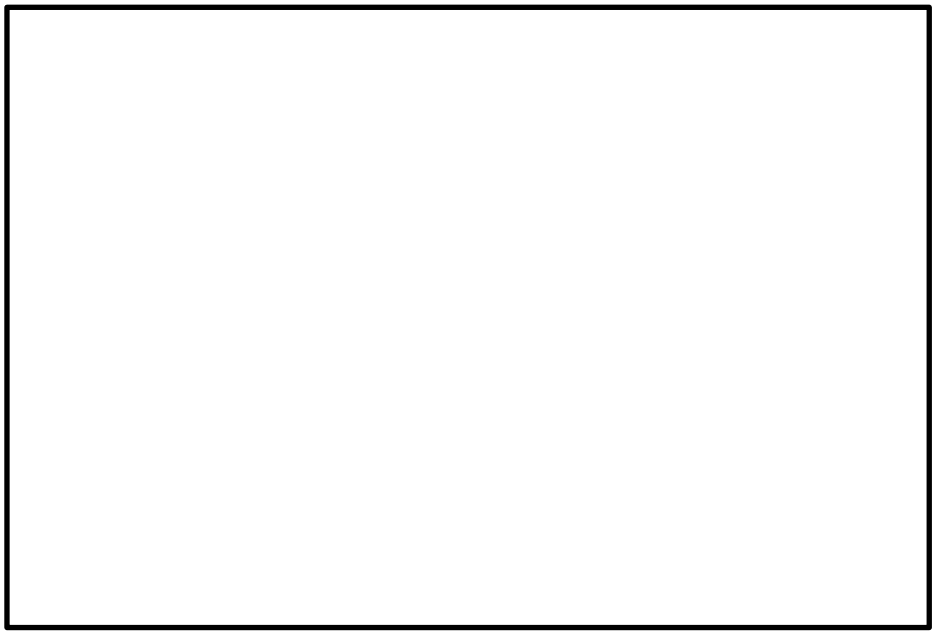
[2] S. Ishimoto, et al., “Improved Zr Alloys for High Burnup BWR Fuel”, Top_Fuel 2006 (2006 International Meeting on LWR Fuel Performance, 22-26 October 2006, Salamanca, Spain)

燃料被覆管応力評価における許容応力について

燃料被覆管の許容応力（降伏応力及び引張強さ）は，中性子照射量と燃料被覆管温度に依存するため，燃料メーカーの試験結果に基づき，添付 5-1～5 図のように設定している。

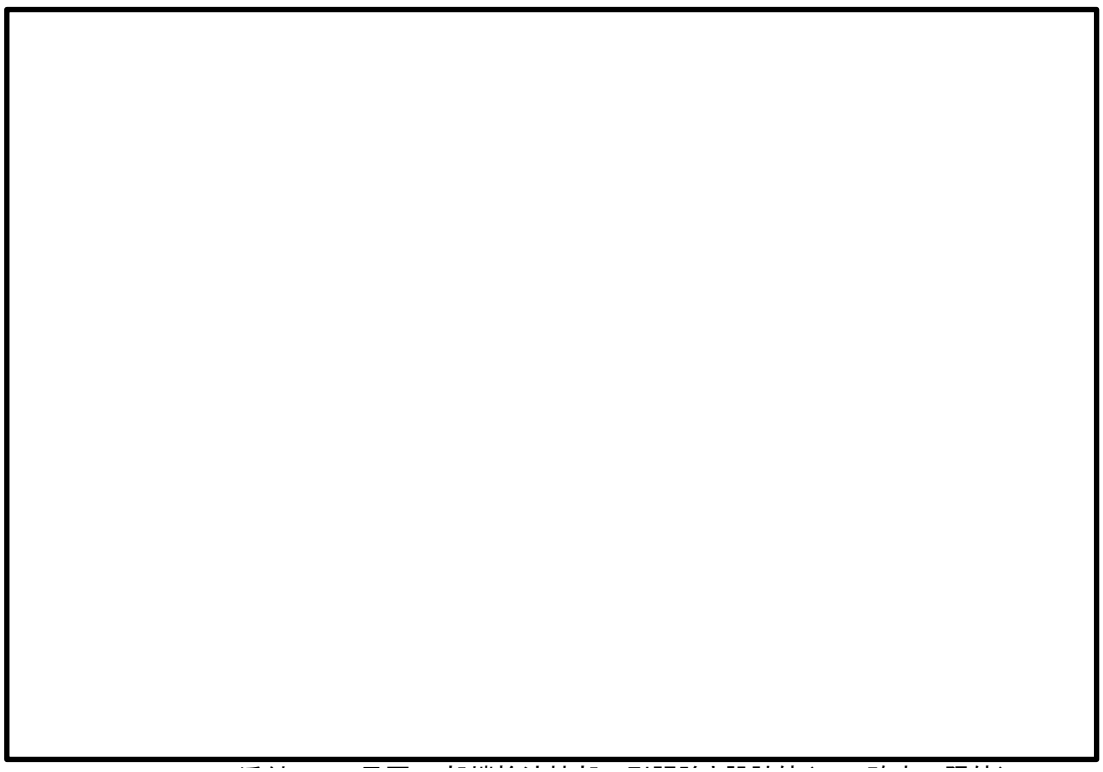


添付 5-1 図　スペーサ間，スペーサ部の引張強さ及び降伏応力設計値（公称値）
（９×９燃料（A 型），MOX 燃料）

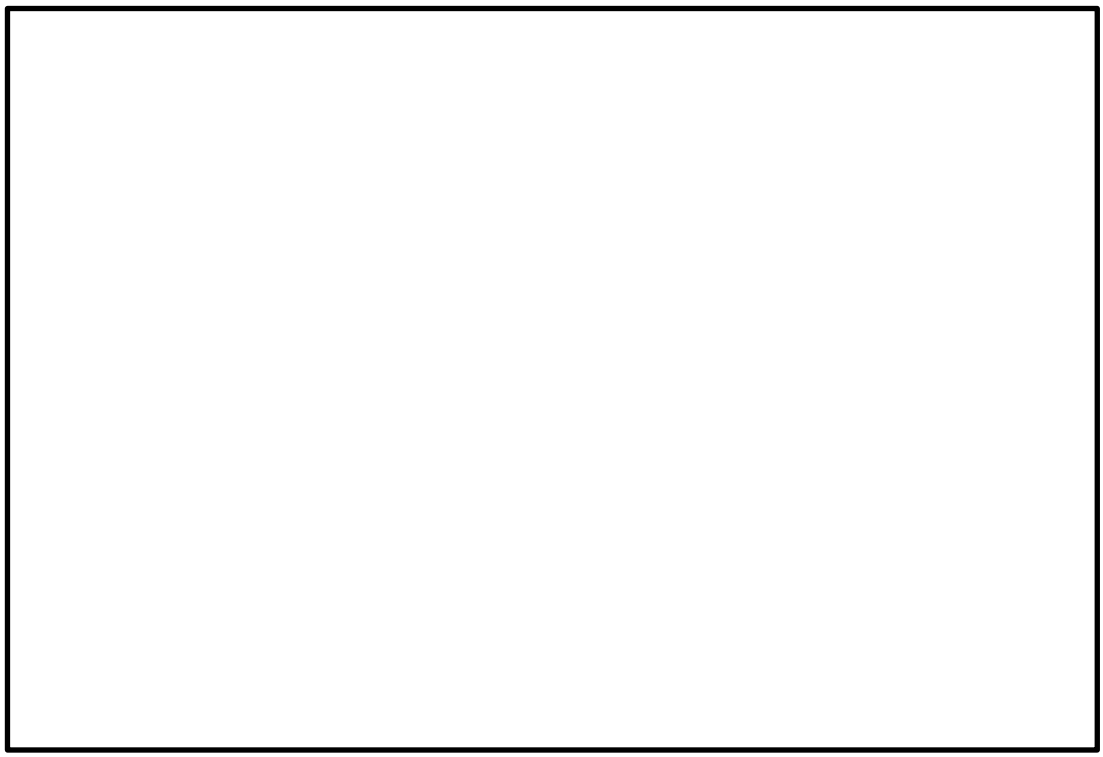


添付 5-2 図　下部端栓溶接部の降伏応力設計値（95%確率下限値）
（９×９燃料（A 型），MOX 燃料）

本資料のうち，枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

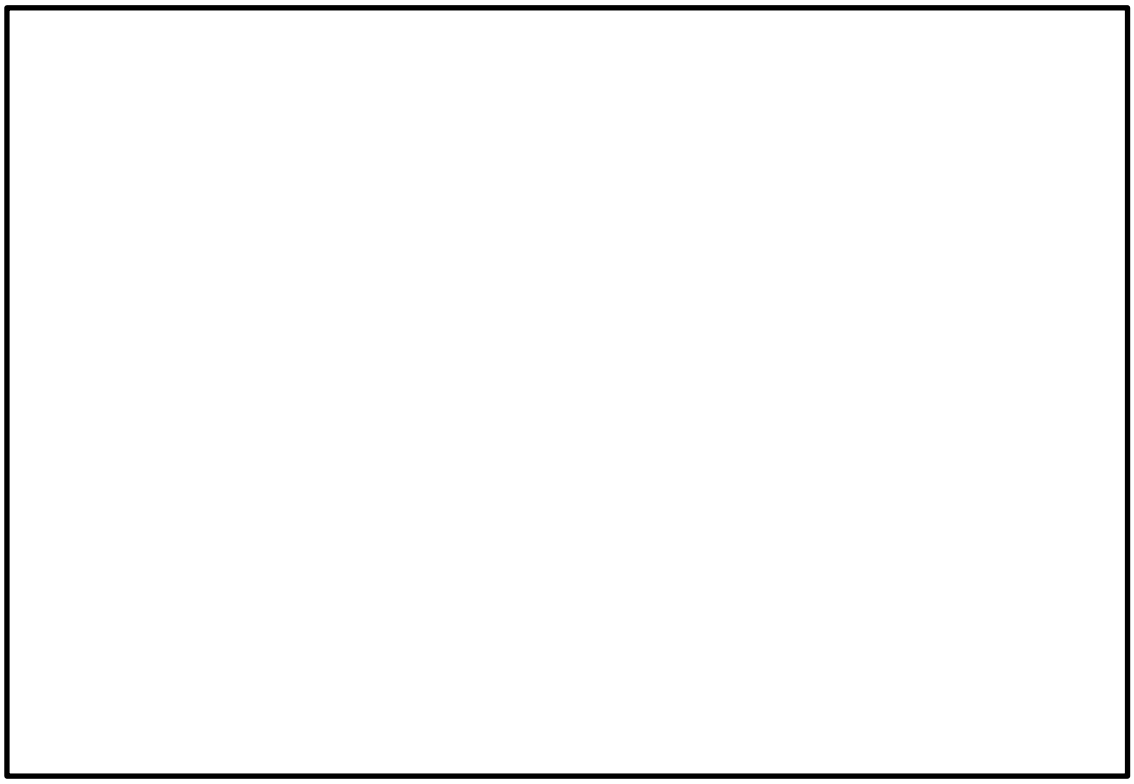


添付 5-3 図　下部端栓溶接部の引張強さ設計値（95%確率下限値）
（９×９燃料（A 型），MOX 燃料）



添付 5-4 図　スペーサ間，スペーサ部の引張強さ及び降伏応力設計値
（公称値）（９×９燃料（B 型））

本資料のうち，枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

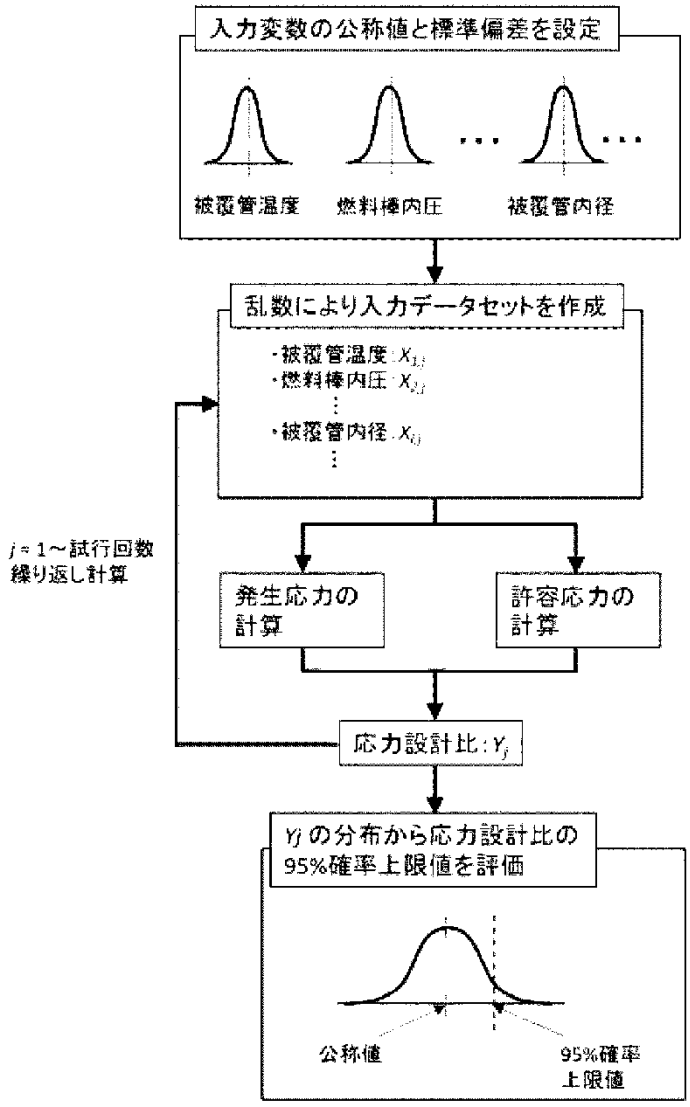


添付 5-5 図　下部端栓溶接部の引張強さ及び降伏応力設計値（95%確率下限値）
（９×９燃料（B 型））

本資料のうち，枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

燃料被覆管応力評価におけるモンテカルロ法による統計処理について

燃料被覆管応力評価におけるモンテカルロ法による統計処理の概要フローを添付6-1図に示す。モンテカルロ法による統計処理では，入力変数に公称値と標準偏差を定め，一回の試行ごとに統計的分布に従った入力データセットを乱数により作成し，応力設計比を求める。本試行を繰り返すことで応力設計比の統計的分布を求め，95%確率上限値が１以下であることを確認する。



添付 6-1 図　モンテカルロ法による統計処理の概要フロー

下部端栓溶接部の応力評価に使用する有限要素法解析コードについて

下部端栓溶接部は切り欠き形状を含む複雑形状のため，下部端栓溶接部の応力評価に当たっては，有限要素法を用いる。９×９燃料（A 型）及び MOX 燃料の下部端栓溶接部の応力評価に使用する有限要素法解析コードについては，既許認可の評価[1] [2]では MARC を使用しているが，今回の評価では，汎用有限要素法解析コードの集約化のため９×９燃料（B 型）の下部端栓溶接部の応力評価に用いている ANSYS を使用する。

本資料では，９×９燃料（A 型）及び MOX 燃料の下部端栓溶接部の評価に ANSYS を適用しても支障がないことを説明する。

1. ANSYS の使用実績

本解析コードは，スワンソン・アナリシス・システムズ（現，アンシス）により開発された有限要素法による計算機プログラムである。

本解析コードは，広範囲にわたる多目的な有限要素法による計算機プログラムであり，伝熱，構造，流体，電磁界及びマルチフィジックス解析を実施するものである。

本解析コードは，ISO9001 及び ASME NQA-1 の認証を受けた品質保証システムのもとで開発され，アメリカ合衆国原子力規制委員会による 10CFR50 並びに 10CFR21 の要求を満たしており，数多くの研究機関や企業において，航空宇宙，自動車，機械，建築，土木等の様々な分野の構造解析に広く利用されている。また，９×９燃料（B 型）の原子炉設置（変更）許可申請書，燃料体設計認可申請書における下部端栓溶接部の応力評価や工事計画認可申請書における応力解析等に対し使用実績がある。

本解析コードを適用するにあたり，以下の確認を行っている。

・開発元のリリースノートの例題集において，多くの解析例に対する理論解と解析結果との比較により検証されている。

・本解析コード配布時に同梱された ANSYS Mechanical APDL Verification Testing Package を入力とした解析により，上記例題集の検証を再現できることを確認している。

・本解析コードの運用環境について，開発元から提示された要件を満足していることを確認している。

2. 下部端栓溶接部の応力評価の方法

2.1 下部端栓溶接部の応力評価モデル

下部端栓溶接部の応力評価フローを添付 7-1 図に示す。下部端栓溶接部の応力評価では，最初に下部端栓溶接部近傍の下部端栓，被覆管及びペレットをモデル

化し（添付 7-2 図参照），有限要素法を用いた熱解析により下部端栓溶接部近傍での温度分布を評価する。次に，熱解析で得られた下部端栓溶接部近傍の温度分布を読み込み，熱膨張差による熱応力の分布，通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時における荷重条件に基づき発生する応力分布を，有限要素法を用いた機械解析により評価する。

2.2 下部端栓溶接部の応力評価における解析入力値

(1)熱解析における入力データ

通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時における下部端栓溶接部近傍の温度分布を評価するため，以下の項目を入力している。

・ペレットの発熱
・ジルカロイ部材のγ発熱
・ペレットー被覆管ギャップ熱伝達係数 [redacted]
・被覆管表面熱伝達係数 [redacted]
・ペレット及びジルカロイ部材の熱伝導率

なお，解析モデル上下端は断熱の境界条件とし，ペレットー下部端栓接触面には熱抵抗がないものとして，上記の保守側の入力と合わせて，下部端栓溶接部近傍の温度分布による熱応力が大きくなるような解析を実施する。

(2)機械解析における入力データ

通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時に下部端栓溶接部に作用する荷重として，

・下部端栓及び被覆管部における温度分布（熱解析結果を読み込む）
・燃料棒内圧 [redacted]
・冷却材圧力 [redacted]
・内外圧力差による軸方向荷重（軸方向応力）
・被覆管周方向温度差及び端栓取付角公差による初期曲がりに基づく曲げ荷重（曲げ応力）

を考慮する。

MARC 及び ANSYS による下部端栓溶接部の応力評価における解析入力値の比較を添付 7-1 表にまとめる。同表に示すとおり，MARC と ANSYS の解析入力値は，一部の物性値について温度依存性を関数式で入力するかテーブル形式で入力するかの差があることを除いては全て同一であり，同等な入力条件を設定可能である。

本資料のうち，枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

2.3 設計比の評価

設計比の評価では，燃料被覆管温度，燃料棒内圧，炉心条件，燃料棒寸法及び許容応力の統計的分布を考慮し，それぞれの 95%確率上下限値に基づき解析結果が保守側となるように設定した入力値を用いて決定論的評価を実施する。ここで，燃料被覆管温度，燃料棒内圧については，燃料棒熱・機械設計コードによる解析結果を用いる。応力計算は，下部端栓溶接部に発生する三軸方向（半径方向，円周方向及び軸方向）の応力を解析し，それらより相当応力を計算する。また，許容応力については下部端栓溶接部の温度及び照射の影響を考慮した保守側の 95%確率下限値を用いる。

3. まとめ

上記のとおり，ANSYS は数多くの研究機関や企業での使用実績があること，９×９燃料（B 型）の下部端栓溶接部の応力評価でも使用されていること，MARC と ANSYS の応力評価モデルは同一であり，解析入力条件も同等な設定が可能であることから，９×９燃料（A 型）及び MOX 燃料の評価に ANSYS を適用しても支障はないと考える。

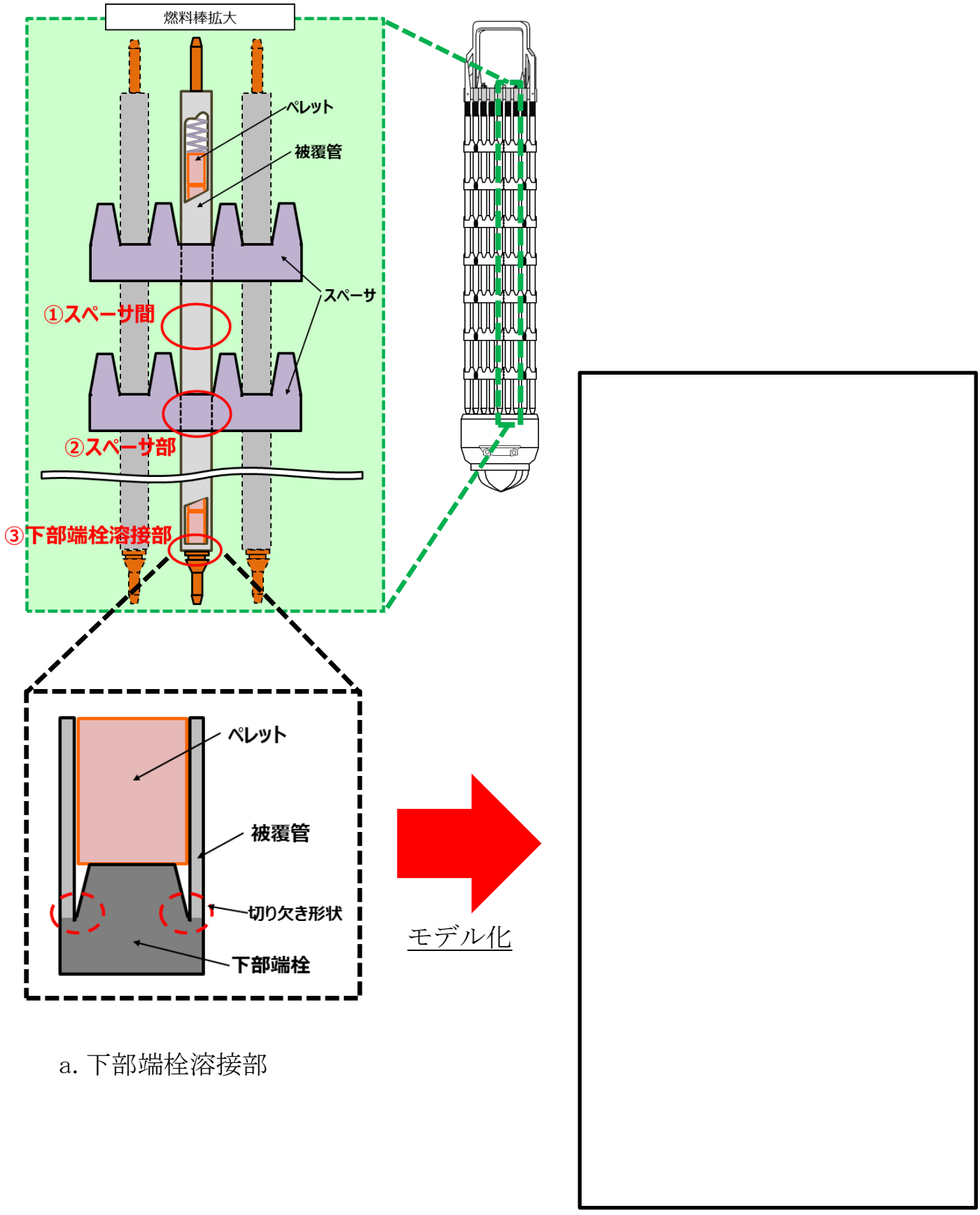
参考文献

[1] 島根原子力発電所「燃料体設計認可申請書」（GNF 燃設認第 30 号，平成 21 年１月７日認可）

[2] 島根原子力発電所原子炉設置変更許可申請書（２号原子炉施設の変更）及び同添付書類）（平成 18 年 10 月 23 日付け申請，平成 20 年１月 30 日付け一部補正，平成 20 年９月５日付け一部補正）



添付 7-1 図　下部端栓溶接部の応力評価のフロー



a. 下部端栓溶接部

添付 7-2 図　下部端栓溶接部の有限要素モデル

本資料のうち，枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

添付 7-1 表 MARC 及び ANSYS による下部端栓溶接部の
応力評価における解析入力値（1/2）

解析	項　目	MARC への入力	ANSYS への入力

本資料のうち，枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

添付 7-1 表 MARC 及び ANSYS による下部端栓溶接部の
応力評価における解析入力値（2/2）

解析	項　目	MARC への入力	ANSYS への入力

本資料のうち，枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

９×９燃料（B 型）における地震時鉛直方向加速度の考慮方法について

９×９燃料（B 型）では，地震時鉛直方向加速度を地震時水平方向加速度によるスペーサ間たわみにより発生する軸方向応力σ_2（式(1)）における質量増加として考慮している。



・・・(1)

ただし，W_0:燃料要素単位長質量，l:スペーサ間距離，G_h：地震時水平方向加速度，I：断面二次モーメント，D_0：燃料被覆管外径とする。

なお，地震時鉛直方向加速度による見掛けの質量増加を式(2)のように定めている。



・・・(2)

ただし，W:実際の燃料要素単位長質量，G_v:地震時鉛直方向加速度，g：重力加速度とする。

式(1)及び式(2)より，式(3)が得られる。



・・・(3)

式(3)の右辺第二項が地震時鉛直方向加速度による応力に相当する。

一方で，地震時鉛直方向加速度が慣性力として直接軸方向応力σ_1として作用すると考えると式(4)の計算式となる（９×９燃料（A 型）及び MOX 燃料の評価方法）

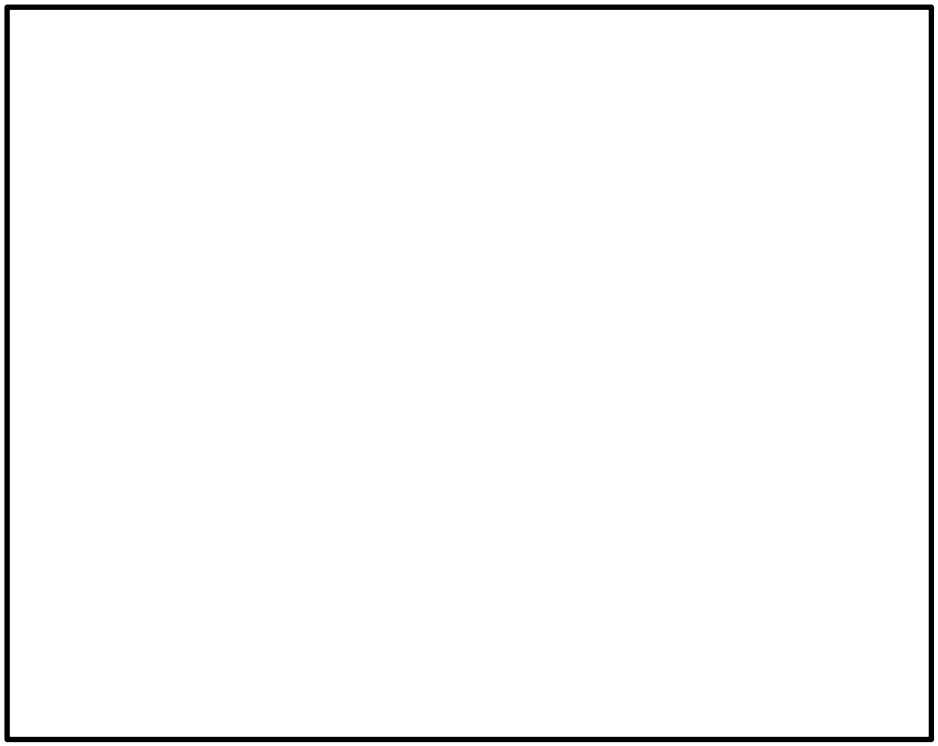


・・・(4)

ただし，W_r:燃料棒総質量，D_1:燃料被覆管内径とする。

本資料のうち，枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

９×９燃料（B 型）の地震時鉛直方向加速度の考慮方法（式(3)右辺第二項）では，地震時水平方向加速度が約［　　］を超える条件において，直接軸方向応力として考慮する場合（式(4)）よりも保守的な評価となる(添付 8－1 図)。島根原子力発電所２号炉では，評価に用いた炉心内の燃料集合体の地震時水平方向加速度が 4.10G（基準地震動 Ss）であり［　　］よりも十分大きいことから，地震時鉛直方向加速度に対する評価として十分保守的な評価となっていることを確認した。



添付 8－1 図　９×９燃料（B 型）の地震時鉛直方向加速度考慮方法の保守性

本資料のうち，枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

添付資料９

評価部位の選定理由について

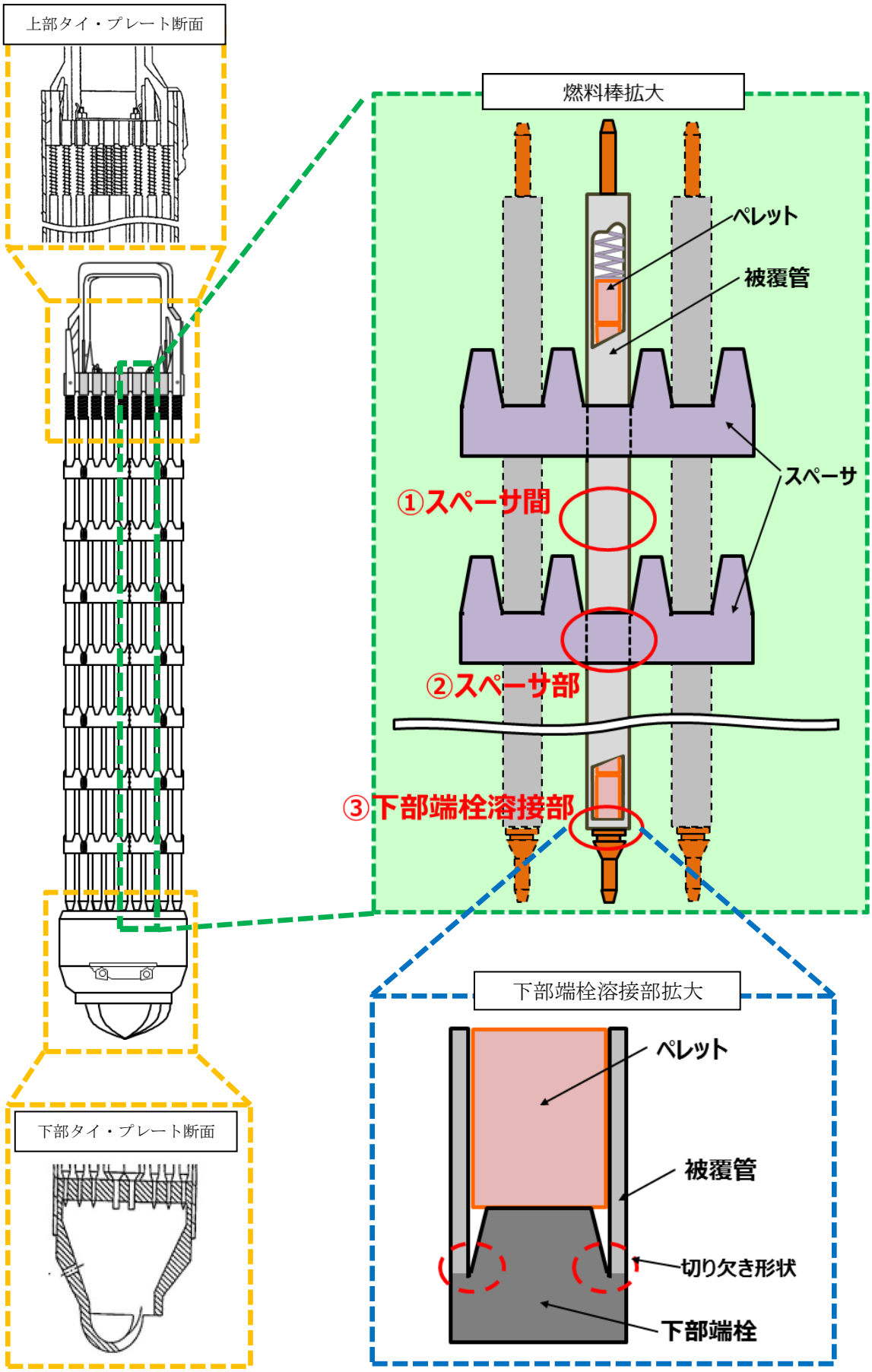
燃料被覆管はその構造から管部，上部端栓溶接部及び下部端栓溶接部に分類することができる。管部についてはスペーサと接触しない部分（スペーサ間）とスペーサと接触する部分（スペーサ部）があり，いずれもその軸方向位置によらず同じ形状である。上部端栓溶接部は中空のプレナム領域を含み重量が小さいことから地震によるたわみに基づく曲げ応力が小さいこと，また，発熱部から離れており熱応力が小さいことから下部端栓溶接部の評価結果に包絡される。これらを踏まえ，スペーサ間，スペーサ部及び下部端栓溶接部を評価部位とする。評価部位の概要図を添付 9-1 図に示す。

燃料被覆管応力評価は，ＪＥＡＧ4601-1987[1]に基づき基準地震動 Ss 等により生じる燃料集合体位置の加速度及び燃料集合体の相対変位を用いて応力値を算出している。添付 9-2 図及び添付 9-3 図に応答算出に用いた地震応答解析モデルを示す。

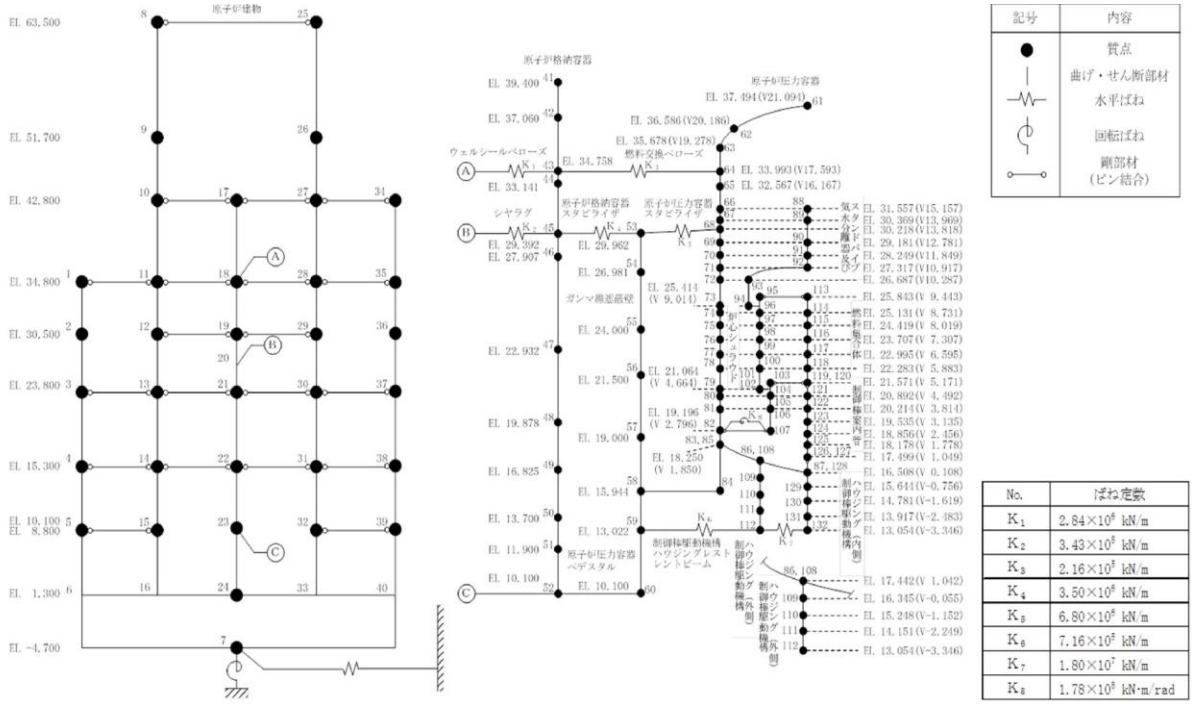
基準地震動 Ss 等により生じる水平方向加速度については，各質点での値の差が大きいため，スペーサ間，スペーサ部及び下部端栓溶接部とも評価部位位置の値を使用しているが，スペーサ間及びスペーサ部については，部位が複数存在することから最厳値を使用している。また，鉛直加速度については，各質点での値の差が比較的小さいため，スペーサ間，スペーサ部及び下部端栓溶接部とも全質点中の最厳値を使用している（添付 9-1 表参照）。

参考文献

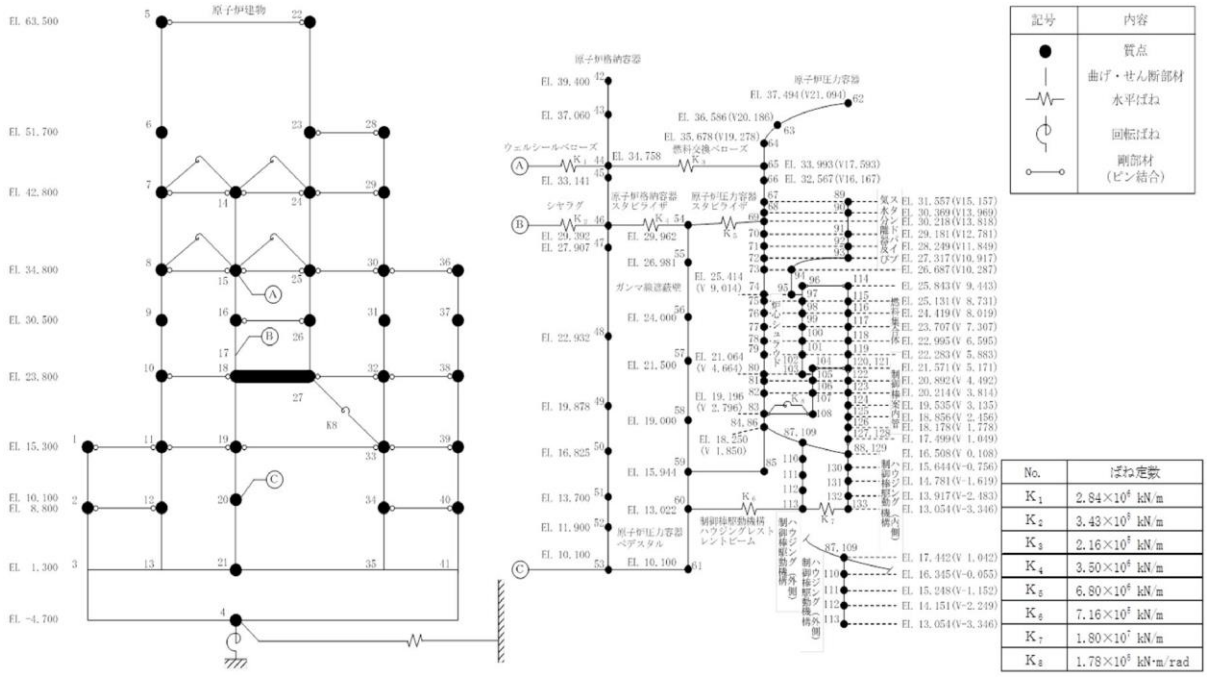
［1］ＪＥＡＧ4601-1987「原子力発電所耐震設計技術指針」，（社）日本電気協会



添付 9-1 図 評価部位の概要図

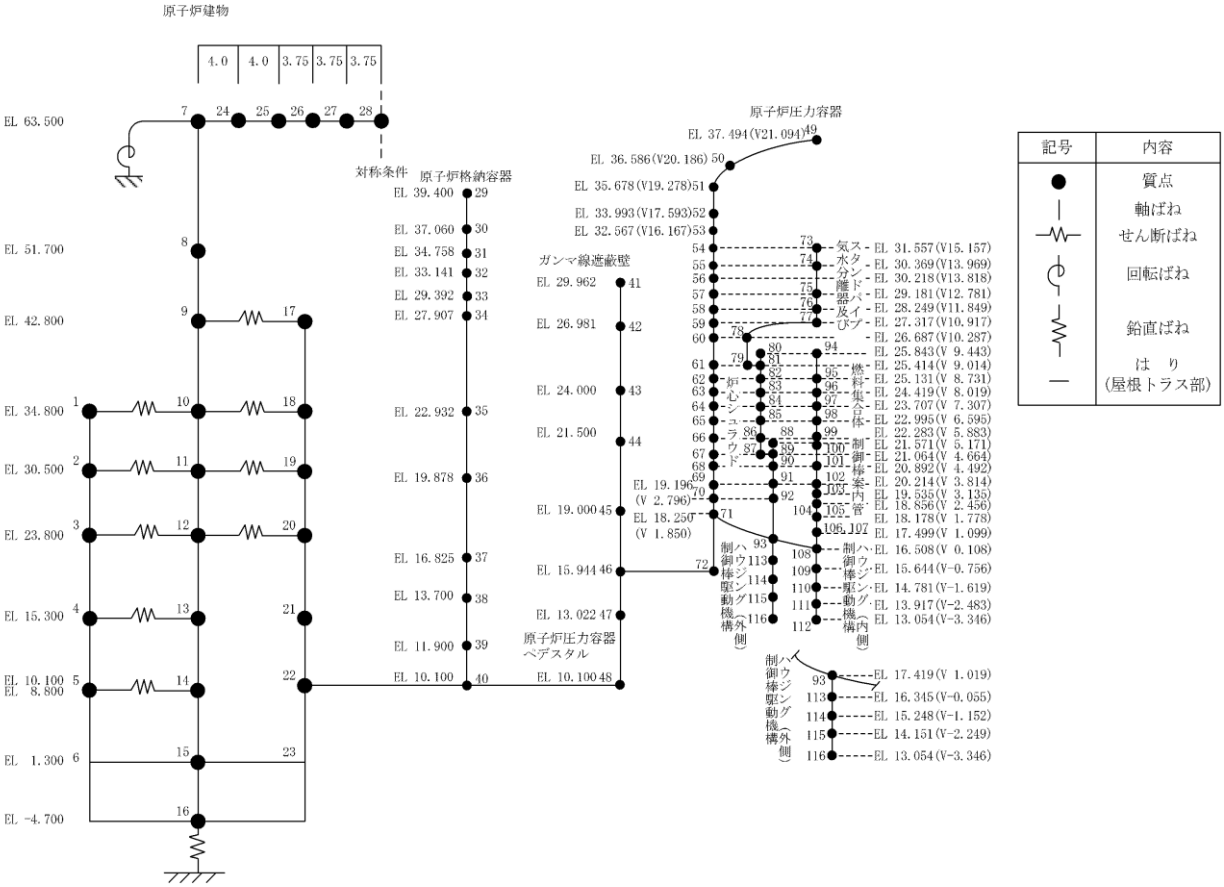


ＮＳ方向



ＥＷ方向

添付 9-2 図 大型機器系地震応答解析モデル（水平方向）



添付 9-3 図 大型機器系地震応答解析モデル（鉛直方向）

添付 9-1 表 基準地震動 Ss 等による燃料集合体の評価用加速度

方向	標高（m）	評価用加速度（G）		適用評価部位
		基準地震動 Ss	弾性設計用地震動 Sd	
水平方向	25.843	1.74	1.27	―
	25.131	2.78	2.51	―
	24.419	3.83	3.63	―
	23.707	4.10	3.97	スペーサ間及びスペーサ部
	22.995	3.45	3.42	―
	22.283	2.21	2.20	下部端栓溶接部
	21.571	1.56	0.89	―
鉛直方向	25.843	1.54	0.78	スペーサ間，スペーサ部及び下部端栓溶接部
	25.131	1.53	0.77	―
	24.419	1.52	0.77	―
	23.707	1.50	0.76	―
	22.995	1.48	0.75	―
	22.283	1.46	0.74	―
	21.571	1.44	0.73	―

燃料被覆管の応力評価に用いる各評価手法の保守性について

1. はじめに

燃料被覆管の応力評価においては，高燃焼度８×８燃料の導入以降，スペーサ間及びスペーサ部の弾性解析ではモンテカルロ法を，下部端栓溶接部の FEM 解析では決定論的手法を用いて応力設計比（＝発生応力／許容応力）を評価している。

2. モンテカルロ法と決定論的手法の保守性の考え方

燃料被覆管（スペーサ間，スペーサ部，下部端栓溶接部）の応力評価における応力設計比は，燃料被覆管寸法，燃料被覆管温度，燃料棒内圧，炉心条件，許容応力等を入力変数とした関数となっている。また，これらの入力変数の不確かさを考慮するため，製造実績，実機運転データ等を考慮し，それぞれの公称値を中央値として統計的分布を設定している。

(1) スペーサ間及びスペーサ部

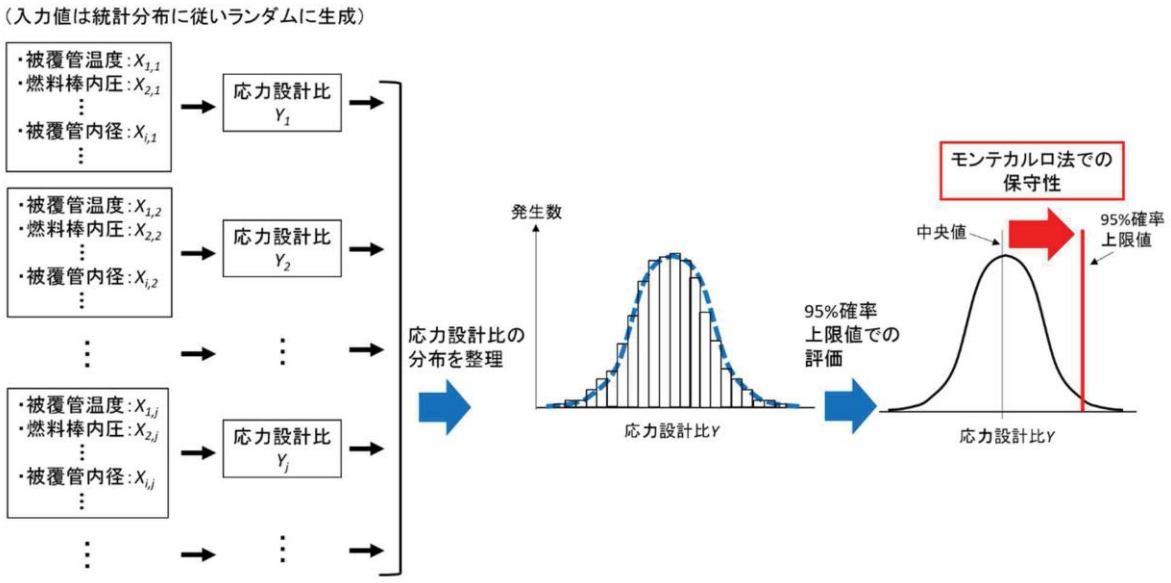
モンテカルロ法では，１回の試行ごとに乱数を用いて，各入力変数の統計的分布から各入力条件を選定し，厚肉円筒式による弾性解析を行い，応力設計比を評価する。この試行を繰り返し実施することにより応力設計比の統計的分布を求め，95%確率上限値における応力設計比が１以下であることで当該部位の健全性を確認するとともに，評価結果に保守性を持たせている（添付 10-1 図参照)。

(2) 下部端栓溶接部

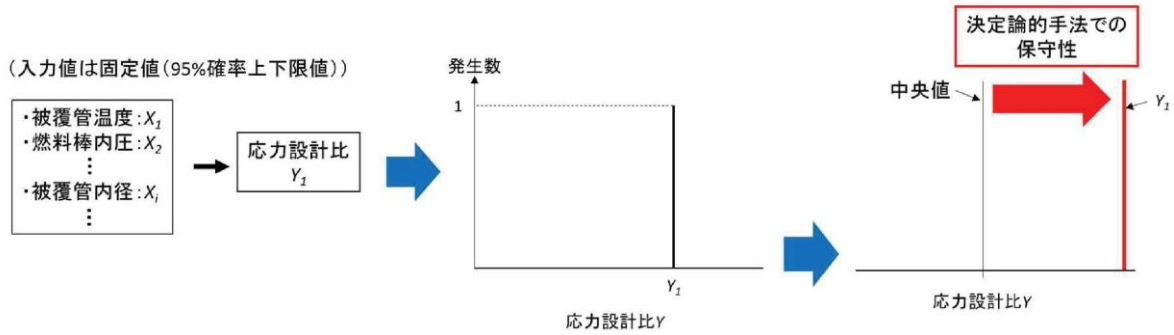
下部端栓溶接部は，切り欠き形状を含んだ複雑形状のため，FEM 解析により応力設計比を評価する。ここで，スペーサ間及びスペーサ部と同様にモンテカルロ法を用いるとすると，入力変数となる燃料被覆管寸法等を変動させる都度，FEM 解析モデルの修正が必要であり，対応が膨大となるため現実的ではない。よって，下部端栓溶接部の応力設計比の評価については，決定論的手法を適用することとし，各入力変数に統計的分布における 95%確率上下限値を用いることで保守性を持たせている（添付 10-1 図参照)。

以上のとおり，スペーサ間及びスペーサ部，下部端栓溶接部ともに結果が保守的になるような評価を行っている。

なお，スペーサ間及びスペーサ部の弾性解析にモンテカルロ法，下部端栓溶接部の FEM 解析に決定論的手法をそれぞれ用いることは,「発電用軽水型原子炉の燃料設計手法について（昭和 63 年５月 12 日，原子力安全委員会了承)」において妥当と判断されており，原子炉設置（変更）許可申請書添付書類八及び燃料体設計認可申請書添付書類Ⅱ（応力解析）において許認可実績を有している。



(a)モンテカルロ法（スペーサ間及びスペーサ部）



(b)決定論的手法（下部端栓溶接部）

添付 10-1 図　モンテカルロ法及び決定論的手法における保守性の概念図

添付資料 11

改正規則の影響について

地震時の燃料被覆管の閉じ込め機能の維持に関する規則改正においては，要求事項が追加された第四条に加えて，第十五条についても要求事項に変更のない記載の適正化が行われている。

本規則改正に対する第四条への基準適合性は「2.2 追加要求事項への適合性に係る設計方針」に示したとおりであり，第十五条については以下のとおり基準適合性確認に影響を与えるものではない。

（炉心等）

第十五条　設計基準対象施設は、原子炉固有の出力抑制特性を有するとともに、発電用原子炉の反応度を制御することにより核分裂の連鎖反応を制御できる能力を有するものでなければならない。

2　炉心は、通常運転時又は運転時の異常な過渡変化時に発電用原子炉の運転に支障が生ずる場合において、原子炉冷却系統、原子炉停止系統、反応度制御系統、計測制御系統及び安全保護回路の機能と併せて機能することにより燃料要素の許容損傷限界を超えないものでなければならない。

3　燃料体、減速材及び反射材並びに炉心支持構造物は、通常運転時、運転時の異常な過渡変化時及び設計基準事故時において、発電用原子炉を安全に停止し、かつ、停止後に炉心の冷却機能を維持できるものでなければならない。

4　燃料体及び反射材並びに炉心支持構造物、熱遮蔽材並びに一次冷却系統に係る容器、管、ポンプ及び弁は、一次冷却材又は二次冷却材の循環、沸騰その他の一次冷却材又は二次冷却材の挙動により生ずる流体振動又は温度差のある流体の混合その他の一次冷却材又は二次冷却材の挙動により生ずる温度変動により損傷を受けないものでなければならない。

5　燃料体は、通常運転時における圧力、温度及び放射線に起因する最も厳しい条件において、必要な物理的及び化学的性質を保持するものでなければならない。

6　燃料体は、次に掲げるものでなければならない。

一　通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時における発電用原子炉内の圧力、自重、附加荷重その他の燃料体に加わる負荷に耐えるものとすること。

二　輸送中又は取扱中において、著しい変形を生じないものとすること。

<u>規則への適合性</u>

地震時の燃料被覆管の閉じ込め機能の維持に係る変更においては，既存設備の変更はなく，及びそれらの運用の変更は伴わないことから，炉心等に係る基準適合性確認に影響を与えるものではない。

ただし，本規則改正に伴い第十五条第６項の記載は適正化されていることから（要求事項の変更はない。），規則への適合のための設計方針について，以下のとおり記載の適正化を図る。

適合のための設計方針

５及び６の一について

燃料体は，発電用原子炉内における使用期間中を通じ，通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時においても，燃料棒の内外圧差，燃料棒及び他の材料の照射，負荷の変化により起こる圧力・温度の変化，化学的効果，静的・動的荷重，燃料ペレットの変形，燃料棒内封入ガスの組成の変化等を考慮して，各構成要素が，十分な強度を有し，その機能が保持できる設計とし，通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時における発電用原子炉内の圧力，自重，附加荷重，核分裂生成物の蓄積による燃料被覆材の内圧上昇，熱応力等の荷重に耐える設計とする。

燃料集合体には燃料棒を保護する機能を持つチャンネルボックスをかぶせる。

また，上記設計方針に対する燃料集合体の機械設計について，従前より通常運転時及び運転時の異常な過渡変化時を考慮した設計を行っており，その具体的な設計方針（評価結果含む）は，発電用原子炉設置変更許可申請書の添付書類八，3.2 機械設計に記載している。なお，「3. 追加要求事項に係る評価項目の選定」にて言及した燃料被覆管応力，累積疲労サイクル，過度の寸法変化防止についても上記設計方針に含まれており，これらに適合するように燃料体の設計を行っている。

燃料集合体に対する鉛直地震動の影響について

燃料集合体は，燃料取替の観点から上向きに拘束されておらず燃料支持金具に差し込まれ自重によって支持される構造となっている。従って，１Ｇを超過する鉛直地震動の影響で，燃料集合体が浮き上がる可能性がある。

この浮上りが燃料集合体に及ぼす影響について，既往知見を調査し，検討した結果を以下に示す。

1. 既往知見調査

鉛直地震動による燃料集合体への影響を検討した既往知見として以下を調査した。

(1) 平成17年度 原子力施設等の耐震性評価技術に関する試験及び調査　機器耐力その２（ＢＷＲ制御棒挿入性）に係る報告書（平成18年９月，原子力安全基盤機構）

(2) 浜岡原子力発電所３，４号機「発電用原子炉施設に関する耐震設計審査指針」の改訂に伴う耐震安全性評価に関わる報告のうち耐震設計上重要な機器・配管系の耐震安全性評価（補足説明資料）（平成19年10月23日，中部電力株式会社）

2. 既往知見の検討内容

2.1　原子力安全基盤機構の知見

原子力安全基盤機構の知見（以下，「JNES知見」という）で確認している内容は以下のとおり。

(1)制御棒挿入性への鉛直地震動の影響

制御棒挿入解析モデルを用いた解析によって，水平地震動のみをインプットとした場合と，水平＋鉛直地震動（最大１Ｇ程度）をインプットとした場合の挿入時間を比較し，その差が0.01秒と極めて影響は軽微（要求機能：75%挿入で1.62秒以内）であることを確認している。燃料集合体の支持状態を表した模式図を添付12-1図に，鉛直地震動の影響検討結果を添付12-2,3図に示す。

なお,挿入解析においては,流体抵抗力や浮力などの水の影響を考慮する他に,燃料集合体と制御棒の接触，摩擦による相互影響も考慮した解析となっている。

(2) 鉛直地震動による燃料集合体浮上りの検討

鉛直地震動による浮上りは，炉水の流れによる上方向への流体力を考慮した状態で,鉛直加速度２Gで最大22㎜程度となるが,燃料集合体は燃料支持金具に60㎜程度差し込まれているため,燃料支持金具から脱落するような現象は起こらない。評価結果を添付12-4図に示す。

(3) 浮上り発生状態での水平地震力に対する検討

鉛直地震動による浮上りが発生している状態で，水平地震動による水平力が負

荷された場合でも，燃料集合体が燃料支持金具から脱落しないことを確認している。浮上り＋水平力のイメージを添付12-6図に示すが，水平方向のせん断力によって燃料集合体が燃料支持金具に乗り上げる力が働くため,その影響を確認する。

鉛直方向に２Gの加速度で22㎜程度浮き上がった状態で水平方向に10Gの加速度を入力した場合でも,水平力による燃料集合体の浮上りは1.3㎜となることから鉛直と合算しても23㎜程度となり，燃料集合体の差し込み深さ60㎜に対して十分に余裕がある結果となっている。

なお，JNES知見で検討した燃料集合体と島根２号炉の燃料集合体の仕様について比較した結果を添付12-1表に示す。島根２号炉では，ハフニウム型制御棒とB4C型制御棒を使用している。ハフニウム型制御棒とB4C型制御棒では，中性子吸収材が相違している以外はほぼ同一の形状で，質量もほぼ同等であり，表面を覆うシース材料も同じであることから，制御棒型式の違いによる影響は軽微と判断できるため，JNES知見について，島根２号炉への適用性はあるものと考えている。

2.2　浜岡原子力発電所３，４号機での知見

浜岡原子力発電所３，４号機での知見（以下，「浜岡知見」という）で確認している内容は以下のとおり。

(1) 制御棒挿入性への鉛直地震動の影響

水平地震動のみの加振試験結果と水平＋鉛直地震動を用いた加振試験結果の比較から,制御棒の挿入時間に影響がないことを確認している。比較結果を添付12-7図に示す。

(2) 鉛直地震動による燃料集合体浮上りの検討

シミュレーション解析によって，鉛直地震動による浮上りが小さいことを確認している（1.5Gで８㎜程度）。

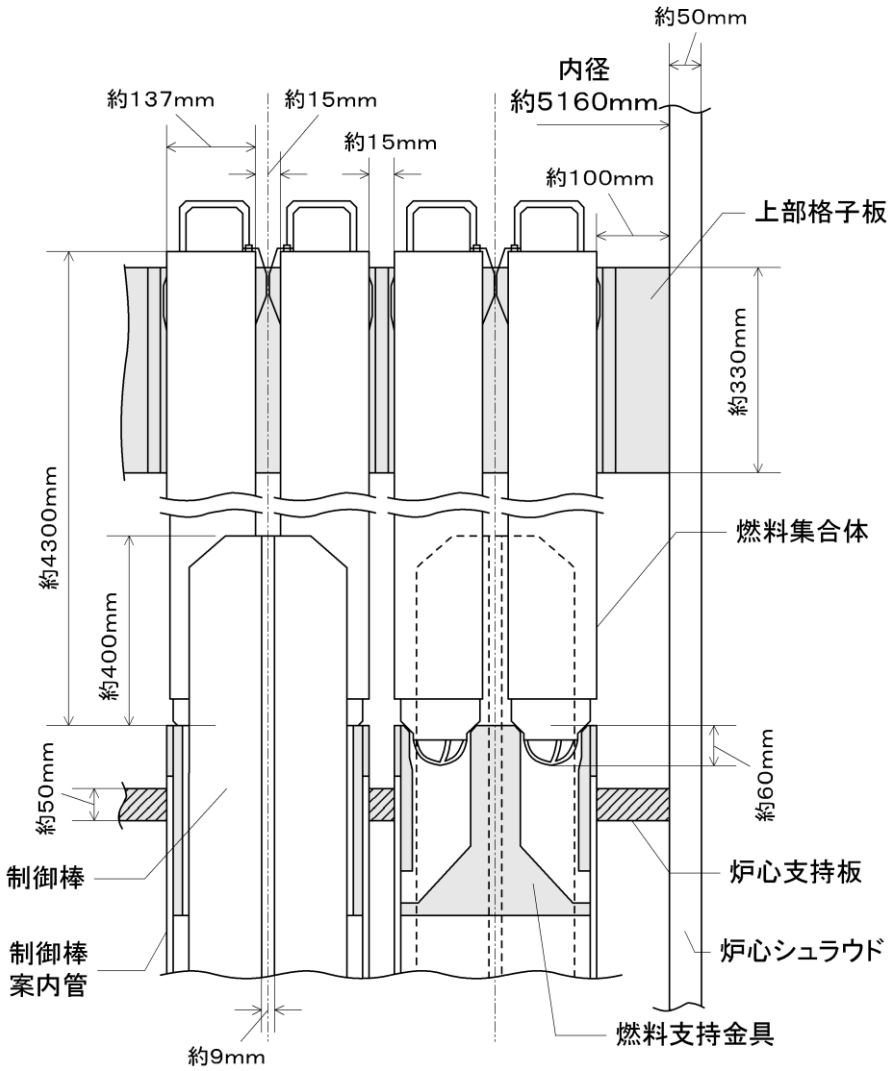
3. 島根２号炉における検討

基準地震動Ssによる燃料集合体（燃料支持金具）位置の鉛直方向加速度は1.54G であり，JNES 知見で検討している加速度よりも小さく，浜岡知見で検討している加速度とほぼ同等であることから，燃料集合体の浮上りが発生したとしても燃料支持金具から脱落は起こらない。そのため，鉛直地震動による制御棒挿入性への影響は軽微であると考えられる。

浮上りに伴って燃料集合体と燃料支持金具との衝突が発生するが，島根２号炉の鉛直加速度1.54Gにおいては，添付12-4図より浮上り高さは数㎜程度になると想定されるため，衝突荷重による影響は小さいものと考えられる。また，冷却材流量については，燃料集合体と燃料支持金具の間の流量が増加し，燃料集合体内の流量に影響を与える可能性が考えられるが，鉛直地震動が１Gを超過する規模の地震が発生した場合には，地震動によって原子炉はスクラムすることから炉心の出力は速やかに低下し，更には添付12-5図に示すとおり，燃料集合体の浮上り量が数㎜程度であり，浮上り時

間もごく僅かであることから，その影響は非常に小さいものであると考えられる。

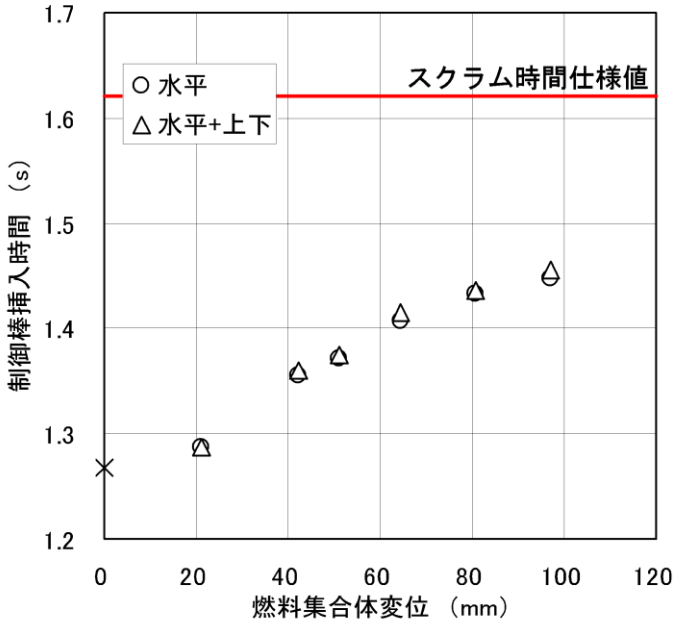
なお，燃料集合体上部においては，チャンネルボックスは外周部を上部格子板で囲まれ水平方向の移動を拘束されていることから，地震の影響によって，チャンネルボックスの設置状況に変化が生じることはないものと考えられる。また，添付12-1図及び添付12-8 図に示すとおり，チャンネルボックスは側面に取り付けられたチャンネルファスナを介して隣接するチャンネルボックスと接触している。このチャンネルファスナの上下方向における接触長さは約[redacted]㎜となっていることから，数㎜程度の浮上りでチャンネル同士の接触状況に変化が起こることは考えにくい。



※JNES 知見より抜粋

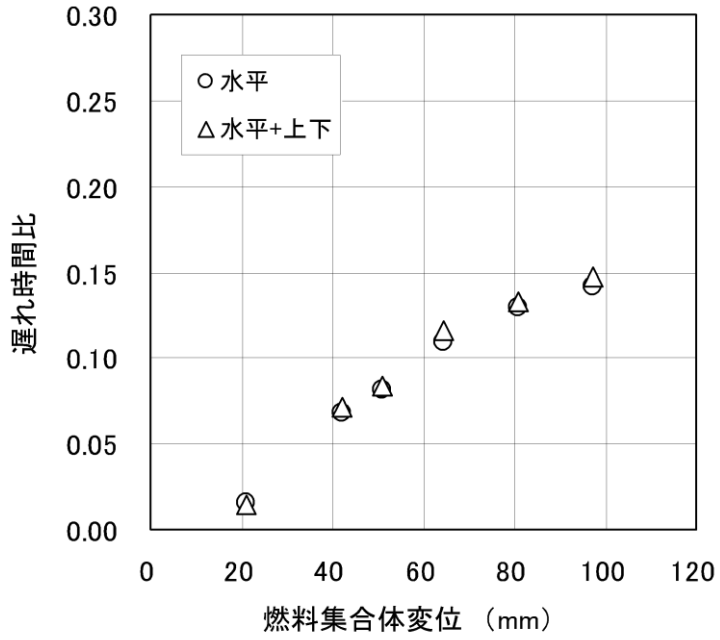
添付12-1図 燃料集合体の支持状態（制御棒挿入率０％）

本資料のうち，枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。



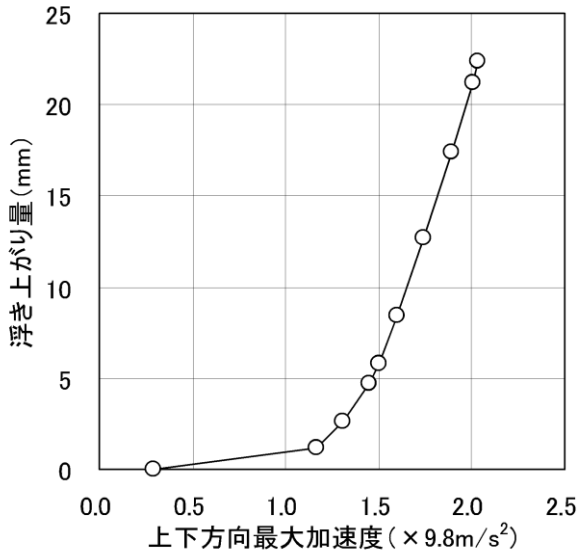
※JNES 知見より抜粋

添付12-2図 制御棒挿入性解析結果（上下動影響比較）



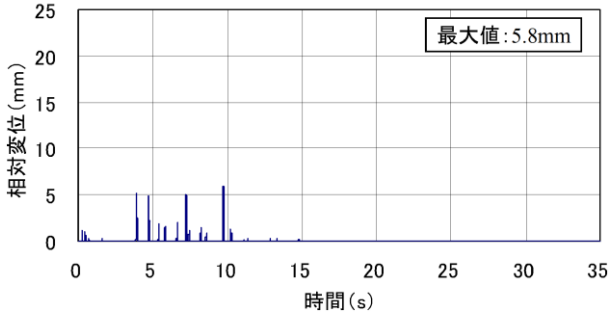
※JNES 知見より抜粋

添付12-3 図 制御棒挿入時間遅れの比較（上下動影響比較）



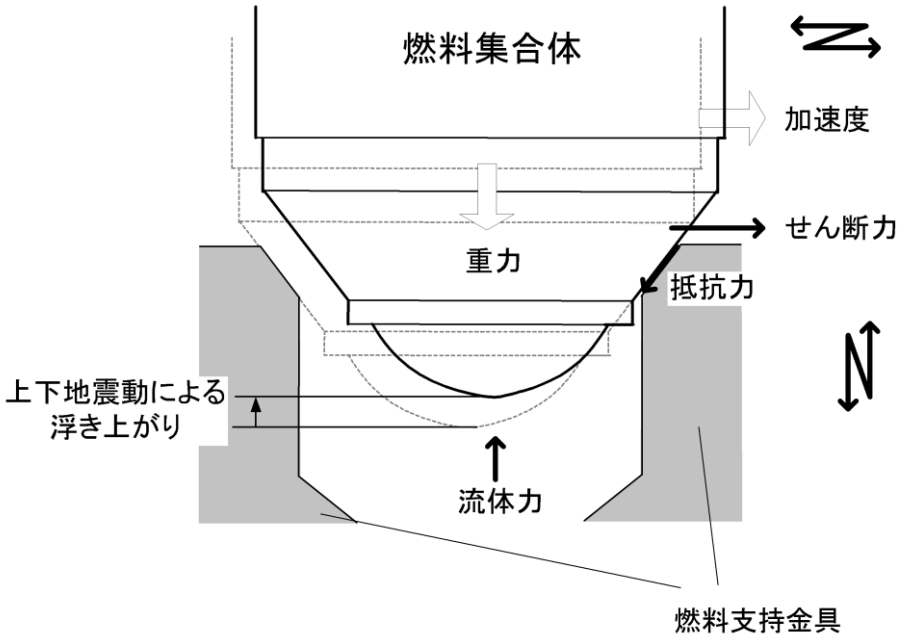
※JNES 知見より抜粋

添付12-4 図 入力加速度と燃料集合体浮上り量の関係



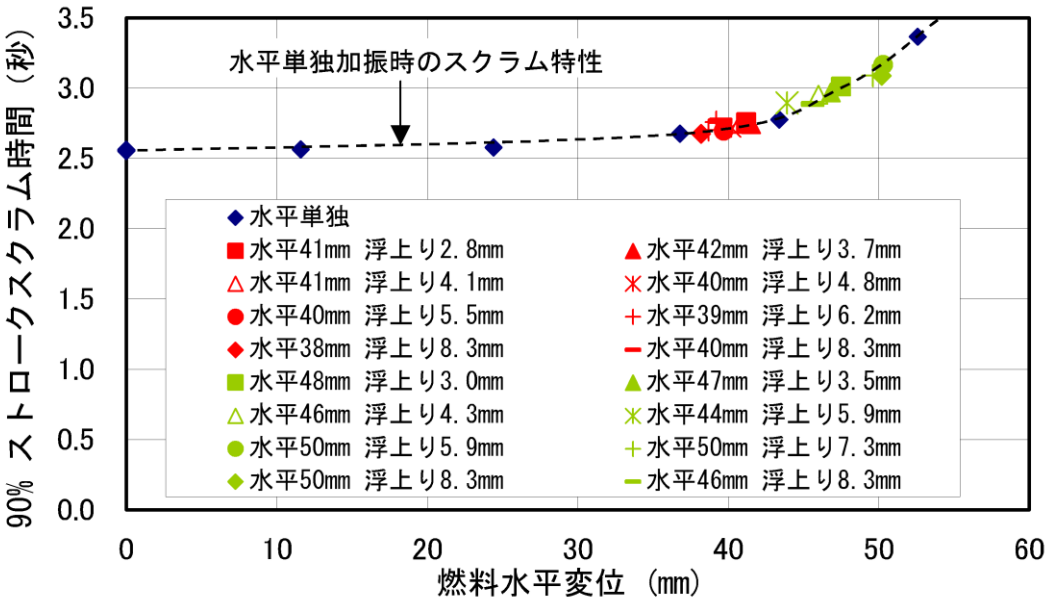
※JNES 知見より抜粋

添付12-5 図 炉心支持板加速度1.5G における燃料集合体と炉心支持板の
相対変位時刻歴



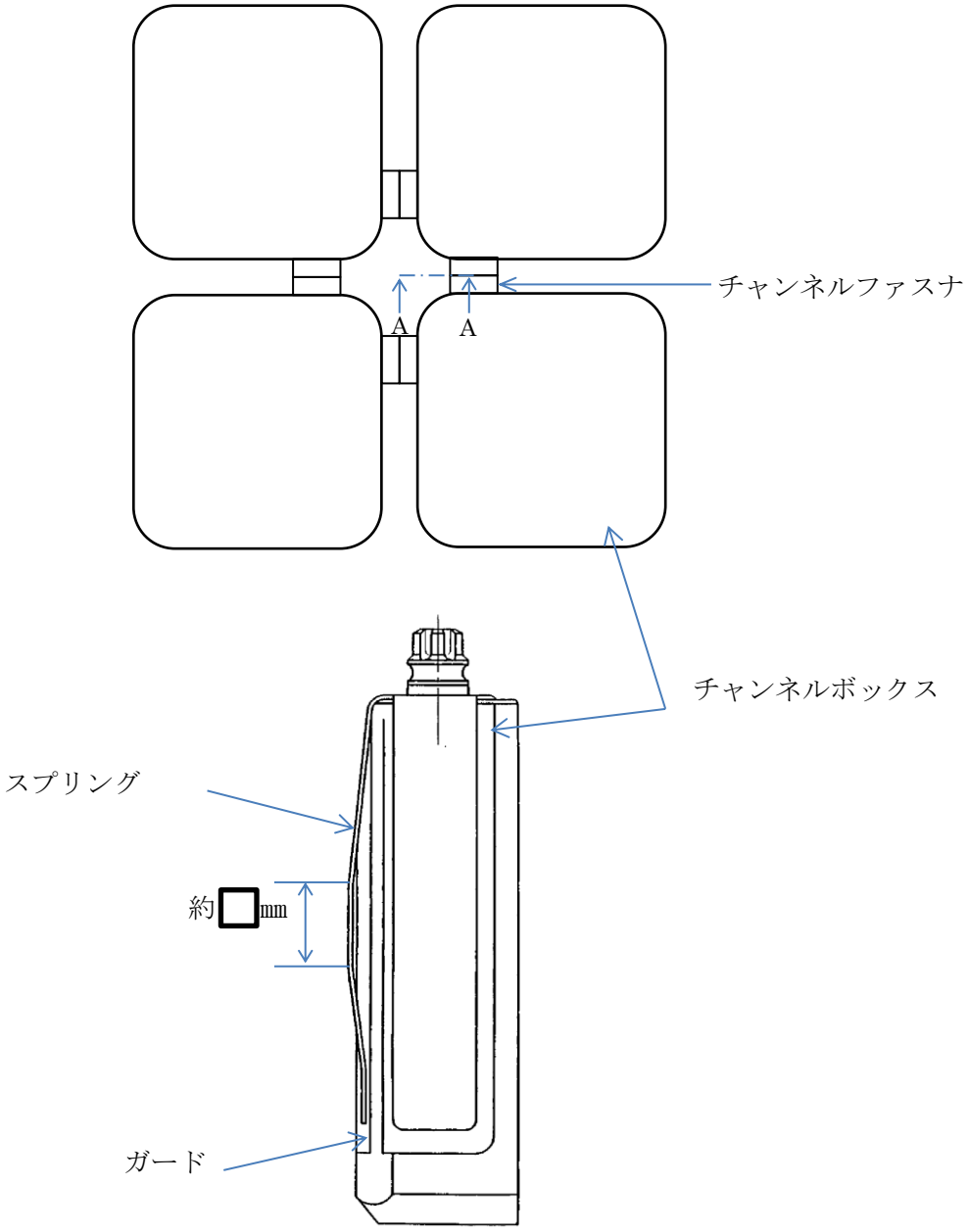
※JNES 知見より抜粋

添付12-6 図 水平，上下方向の地震動による浮上り検討の概要図



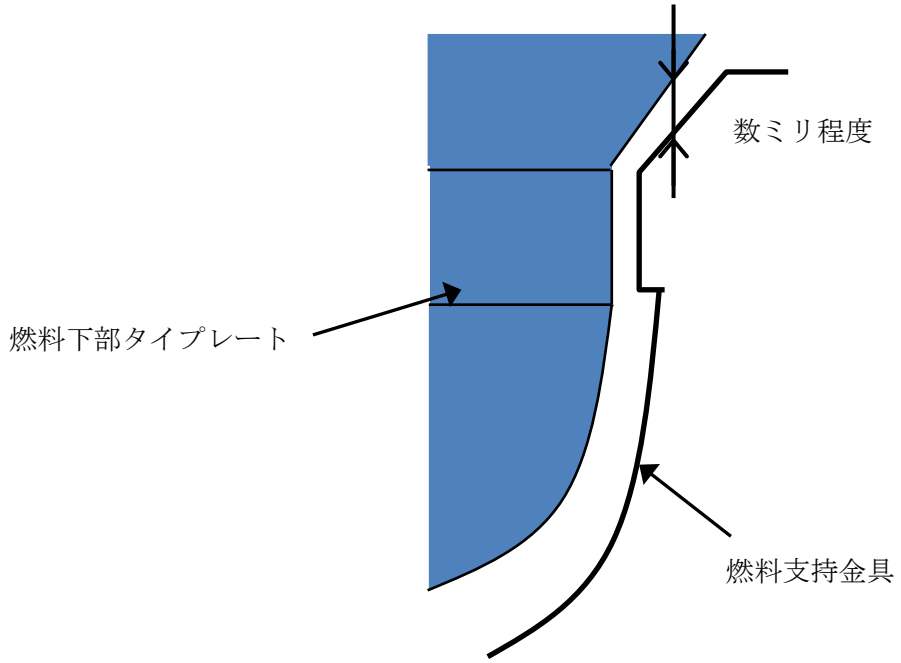
※浜岡知見より抜粋

添付12-7 図 鉛直方向加振による制御棒挿入時間への影響



添付12-8 図 燃料集合体上部のチャンネルファスナの設置状況

本資料のうち，枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。



添付12-9 図 燃料集合体下部のイメージ図

添付12-1 表 制御棒挿入性に関連するJNES 知見と島根２号炉での仕様比較について

評価機器	JNES 知見で適用した型式	島根2号炉の型式	相違の有無
燃料体*	９×９ 燃料	９×９ 燃料	無
チャンネル ボックス	100mil	120mil	有
制御棒	ハフニウム型	ハフニウム型 及びB_4C型	有
上部格子板	S 格子	S格子	無
制御棒駆動機構	FSCRD	FSCRD	無

＊ 燃料集合体の固有値解析の結果，鉛直方向の固有振動数は20Hz以上となることを確認している。

MOX 燃料の燃料被覆管応力評価結果について

９×９燃料(A 型)と MOX 燃料の燃料被覆管応力評価結果の比較について考察する。添付 13-1～3 表に応力設計比が最大となる圧力過渡状態における弾性設計用地震動 Sd に対する９×９燃料（A 型）及び MOX 燃料の燃料被覆管応力評価結果を示す。

また，燃料被覆管の応力評価にあたり各評価対象部位において考慮する応力を添付 13-4 表に，９×９燃料（A 型）及び MOX 燃料の燃料仕様概要を添付 13-5 表に示す。

(1)スペーサ間

個々の発生応力については燃料タイプにより傾向が異なるものがあるが，応力設計比については，(1)内外圧力差に基づく応力の影響が大きいため，燃料棒の初期Ｈｅ加圧量が小さく燃料被覆管の内外圧力差の大きいMOX燃料の方が大きくなっている。

なお，寿命末期では，MOX燃料の線出力密度が９×９燃料（A型）より高いことから燃料被覆管温度が高く，許容応力が小さくなるため，応力設計比の差が大きくなっている。

(2)スペーサ部

スペーサ部で特徴的な応力は，(4)スペーサの接触力に基づく応力である。このスペーサの接触力は寿命初期が最大で，照射の進行とともに大きく緩和するため寿命中期及び寿命末期の応力は寿命初期の２割以下に低下する。

スペーサの接触力に基づく応力は[redacted]するため，スペーサの接触力の大きい寿命初期においては，燃料被覆管肉厚の小さい９×９燃料（A型）の応力設計比がMOX燃料より大きくなっている。スペーサの接触力が小さくなる寿命初期以外では，スペーサ間と同様にMOX燃料が大きくなっている。

(3)下部端栓溶接部

下部端栓溶接部については，MOX燃料の初期Ｈｅ加圧量が小さいためスペーサ間と同様に内外圧差に基づく応力が大きくなる。また，９×９燃料（A型）では下部端栓に接している燃料有効長最下端が天然ウランであるのに対し，MOX燃料棒は燃料有効長最下端もMOXペレットであるため，MOX燃料棒の最下端部の出力が９×９燃料（A型）より高くなる。このため，MOX燃料の方が下部端栓溶接部の温度が高くなり，熱応力が大きくなるとともに，許容応力（降伏応力及び引張強さ）も小さくなることから，MOX燃料の応力設計比の方が大きくなっている。

本資料のうち，枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

添付 13-1 表　燃料被覆管応力の評価結果（スペーサ間）

地震動と許容応力	運転条件	評価点	９×９ 燃料（A 型）	MOX 燃料
弾性設計用地震動 Sd に対して降伏応力 Sy	圧力過渡	寿命初期	0.80	0.84
		寿命中期	0.30	0.34
		寿命末期	0.26	0.44

添付 13-2 表　燃料被覆管応力の評価結果（スペーサ部）

地震動と許容応力	運転条件	評価点	９×９ 燃料（A 型）	MOX 燃料
弾性設計用地震動 Sd に対して降伏応力 Sy	圧力過渡	寿命初期	0.77	0.66
		寿命中期	0.27	0.33
		寿命末期	0.25	0.45

添付 13-3 表　燃料被覆管応力の評価結果（下部端栓溶接部）

地震動と許容応力	運転条件	評価点	９×９ 燃料（A 型）	MOX 燃料
弾性設計用地震動 Sd に対して降伏応力 Sy	圧力過渡	寿命初期	0.72	0.81
		寿命中期	0.34	0.38
		寿命末期	0.26	0.32

添付 13-4 表　各評価対象部位において考慮する応力

考慮する応力	スペーサ間	スペーサ部	下部端栓 溶接部
(1)内外圧力差に基づく応力	○	○	○
(2)水力振動に基づく応力	○	○	—
(3)楕円度に基づく応力	○	○	—
(4)スペーサ（支持格子）の接触力に基づく応力	—	○	—
(5)半径方向温度差に基づく応力	○	○	○
(6)円周方向温度差に基づく応力	○	○	○
(7)膨張スプリング等による軸方向荷重に基づく応力	○	○	○
(8)端栓取付角公差による曲がりに基づく応力	—	—	○
(9)スペーサ（支持格子）間の水平地震力による燃料被覆管のたわみに基づく応力※	○	○	○
(10)チャンネルボックスの水平地震力によるたわみに基づく応力※	○	○	○
(11)鉛直方向地震加速度に基づく応力※	○	○	○

※：地震動を考慮する場合に新たに加わる応力

添付 13-5 表　９×９燃料（A 型）及び MOX 燃料の燃料仕様概要

	９　×　９　燃　料 （A　型）	Ｍ　Ｏ　Ｘ　燃　料
ペレット直径	約0.96cm	約1.04cm
ペレット長さ	約1.0cm	ＭＯＸ焼結ペレット　　約1.2cm UO_2焼結ペレット　　約1.0cm
ペレット密度	理論密度の約９７％	ＭＯＸ燃料棒　　理論密度の約95％ ウラン燃料棒　　理論密度の約97％
ペレット材	UO_2, UO_2－Gd_2O_3	UO_2, UO_2－PuO_2, UO_2－Gd_2O_3
被覆管外径	約1.12cm	約1.23cm
被覆管厚さ	約0.71mm （うちジルコニウム内張約0.1mm）	約0.86mm （うちジルコニウム内張約0.1mm）
被覆管材料	ジルカロイ－２ （ジルコニウム内張）	ジルカロイ－２ （ジルコニウム内張）
燃料集合体全長 （つかみ部分を含む）	約4.47m	約4.47m
燃料棒有効長さ	標準燃料棒　　約3.71m 部分長燃料棒　約2.16m	ＭＯＸ燃料棒　　約3.55m ウラン燃料棒　　約3.71m
ペレット－被覆管間隙	約0.20mm	約0.20mm
プレナム体積比	標準燃料棒　　約0.09 部分長燃料棒　約0.17	ＭＯＸ燃料棒　約0.13 ウラン燃料棒　約0.08
ウラン235濃縮度 　取替燃料集合体平均	約3.7wt％	約1.0～1.2wt％
プルトニウム含有率 　燃料集合体平均プルトニウム含有率 　ペレット最大プルトニウム含有率 　ペレット最大核分裂性プルトニウム富化度 プルトニウム組成比	－	約2.9～5.8wt％ 10wt％以下 ６wt％以下 原子炉級
燃　焼　度 　取替燃料集合体平均 　燃料集合体最高	約45,000MWd/t 55,000MWd/t	約33,000MWd/t 40,000MWd/t
最大線出力密度	44.0kW/m	44.0kW/m
ペレット最高温度 （設計線出力密度）	約1,550℃（UO_2） 約1,650℃ （5.0wt％Gd_2O_3入り）	約1,660℃ （10wt％PuO_2入り） 約1,800℃ （2.0wt％Gd_2O_3入り）
被覆管外面最高温度	約310℃	約310℃
ヘリウム封入圧	約1.0MPa	約0.5MPa
Gd_2O_3濃度	３～５wt％程度	３wt％程度以下
ウォータ・ロッド外径	約2.49cm	約3.40cm
ウォータ・チャンネル外幅	－	－